



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

Lisäaineen kokeellinen käyttäytyminen betonimassassa

Ilkka Koiranen

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2017
Rakennustekniikan insinööri
Rakennustuotanto



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan insinööri
Rakennustuotanto

KOIRANEN ILKKA

Lisäaineen kokeellinen käyttäytyminen betonimassassa

Opinnäytetyö 47 sivua
Huhtikuu 2017

Työssä tutkittiin kemiallisen aineen toimivuutta betonissa ja sen vaikutusta betonin ominaisuuksiin ja soveltuvuutta lisäaineeksi.

Tilajana toimi kemian alan yritys ja työn tarkoituksena oli tutkia aineen soveltuvuutta betonin lisäaineeksi. Tutkimuspaikkana toimi Tampereen ammattikorkeakoulun laboratorio, jossa kokeet tehtiin. Mittausvälineistö oli laboratorion omia. Työssä tehtiin lähes sata koekappaletta, joista määritettiin mm. notkeutta, puristuslujuutta ja ilmamäärää.

Tuloksista saatiin kattava kokonaisuus, jonka avulla pystyttiin esittämään jatkotutkimus- ja parannusehdotuksia tuleviin lisätutkimuksiin sekä mahdollisen lisäaineen koostumukseen.

This Thesis work is part of a project that has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 738517



Co-funded by the Horizon 2020
Framework Programme of the European Union

Asiasanat: betoni, lisäaine, kokeilu

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Civil engineering
Building production

Ilkka Koiranen
Additive experimental behaviour in concrete mass

Bachelor's thesis 47 pages
April 2017

New concrete additive and its effect to final concrete properties have been investigated in this Thesis work. The client is a chemical company that manufactures the additive. The purpose of the study was to investigate the additive's suitability to act as a concrete additive.

Research work was conducted at Tampere University of Applied Sciences laboratory. More than hundred test specimen pieces was produced and analyzed. Obtained results are good and proposal for the future trials is proposed.

This Thesis work is part of a project that has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 738517



Co-funded by the Horizon 2020
Framework Programme of the European Union

Key words: concrete, additive, experiment

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	BETONI YLEISESTI.....	7
2.1	Rakentaminen ja käyttökohteet.....	7
2.2	Betonimassa.....	8
2.2.1	Betonimassan ominaisuudet.....	8
2.2.2	Palonkesto-ominaisuus.....	10
2.3	Teräsbetoni ja sen toimintaperiaate.....	12
2.4	Yleinen kuvaus sementeistä, laaduista ja seossementeistä.....	13
2.5	Lisäaineet.....	15
2.6	Lisäaineen CE-merkki.....	16
2.7	Hintatietoa lisäaineista.....	16
3	VALMISTUSSUUNNITELMA.....	17
3.1	Kiviaines.....	17
3.1.1	Seulonnat.....	18
3.1.2	Kosteus.....	18
3.2	Rakeisuusluku.....	20
3.3	Sementti.....	21
3.4	Suhteutus ja vesi-sementtisuhte.....	22
3.5	Lisäaineet Sem Flow ELE ja PCC.....	23
4	KOKEET / TUTKIMUKSET.....	24
4.1	Puristuslujuus.....	24
4.2	Notkeus.....	27
4.3	Lämmön kehitys.....	28
4.4	Ilmamäärä.....	29
4.5	Kutistuma.....	30
4.6	Taivutusvetolujuus.....	32
4.7	Tavoitteet.....	33
5	TULOKSET.....	35
5.1	Lujuuden muutokset.....	35
5.1.1	Vuorokauden ikäisten puristuslujuus.....	35
5.1.2	Seitsemän vuorokauden ikäisten puristuslujuudet.....	36
5.1.3	28 vuorokauden ikäisten puristuslujuudet.....	37
5.2	Notkeuden muutokset.....	38
5.3	Lämmön kehitys.....	40
5.4	Ilmapitoisuuden muutokset.....	41
5.5	Kutistuman muutokset.....	42

5.6 Vetolujuuden muutokset	42
6 POHDINTA.....	44
LÄHTEET.....	47

1 JOHDANTO

Työn tilaajana toimi FP-Pigments Oy, joka valmistaa lisäaineita maaleihin, papereihin ja muoveihin. Lisäaineiden tavoitteena on saada parempia ominaisuuksia materiaaleihin. Yrityksellä on tuotantolaitoksia Suomessa, Saksassa ja Yhdysvalloissa. Pääkonttori sijaitsee Suomessa ja muita toimipisteitä on maailmalaajuisesti.

Rakentamisessa betonia käytetään runsaasti sen hyvien ominaisuuksien takia. Betoni on kivistä, vedestä ja sementistä koostuva rakennusmateriaali. Sen teko ja käsiteltävyys on helpohkoa valmistusvaiheessa ja se kovettuu lopuksi kovaksi yhtenäiseksi rakenteeksi. Kovettumisen jälkeen betoni kestää rasituksia ja suuria puristusvoimia, mikä onkin betonin tärkein ominaisuus.

Työn teoria osuudessa käsiteltiin betonin ominaisuuksia ja teräsbetonin toimintaa. Teoriaosuudessa selvennetään on tarkoitus selvittää betonin käyttäytymistä ja kerrotaan kuinka sen ominaisuuksia pystytään hyödyntämään rakentamisessa. Samalla pohditaan kuinka betonin lujuusominaisuutta kyetään parantamaan.

Betonimassan valmistus tapahtui Tampereen ammattikorkeakoulun laboratoriossa. Massalle haettiin vastaavia ominaisuuksia kuin normaalisti käytettävällä betonilla on. Kiviainekset olivat tavanomaisia ja ne toimitettiin betonivalmistaja Rudus Oy:n välityksellä, koska näin saatiin käytettäväksi samoja kiviaineksia kuin mitä he käyttävät aktiivi tuotannossaan. Kiviainesten suhteutus tapahtui Nykäsen nomogrammilla ja suhteutuslomakkeen avulla. Betonimassoja valmistettiin kahdeksalla eri koostumuksella ja koe-kappaleita yhteensä 96 kappaletta.

Lisäaineiden tarkoituksena on saada tuotettua betoniin haluttuja ominaisuuksia. Näitä voi olla tuoreessa betonimassassa tai kovettuneessa betonissa. Ominaisuuksista keskeisempiä ovat kovettuneen betonin lujuus ja työstettävän massan notkeus. Kokeellisen lisäaineen avulla lähdettiin tavoittelemaan suurempia varhaispuristuslujuuksia sekä notkeuksia.

Mittauksin tutkittavia asioita olivat puristuslujuuden kehitys, notkeuden-, lämmön- tuoton, ilmapitoisuuden-, kutistuman- ja vetolujuuden muutokset. Tuloksista saatiin kattavat ja raportti lisäaineen tuomista muutoksista

2 BETONI YLEISESTI

Betoni on suosittu materiaali rakentamisessa. Sitä käytetään useimmiten kantavissa rakenteissa. Sen ominaisuudet ovat hyvät Suomen ilmastoa sekä ulkoisia mekaanisia rasitteita vastaan. Suurimpia haittatekijöitä ovat lämpöliikkeet, pakkanen, vesi, karbonatisoituminen ja käyttäjien aiheuttamat iskut.

2.1 Rakentaminen ja käyttökohteet

Betonia käytetään eniten kantavissa rakenteissa sen hyvän puristuslujuuden takia. Betonin puristuslujuus on tavallisissa rakenteissa 30–60 N/mm² välillä. Muita ominaisuuksia ovat iskun kestävyys, helppo työstettävyys ja hyvä säänkestävyys.

Yleisimmät käyttökohteet betonille talon rakennuksessa ovat perustukset, runkorakenteet, julkisivut ja välipohjat. Kerrostaloissa käytetään betonielementtejä, jotka ovat valmiosisia ja pohjautuvat erityyppisiin runkojärjestelmiin. Välipohjia tehdään betonisista ontelolaatoista tai paikalla valetuista teräsbetonilaatoista. Infrarakenteissa betonia käytetään tukimuureissa, betonisissa maapaaluissa ja silloissa. (Betonitekniikan oppikirja by 201 2004, 15.)

Suomessa ja maailmalla rakennetaan paljon betonista. Betonielementti rakentaminen asuinkerrostaloissa on suosittua sen nopeuden, helppouden, kestävyuden ja hinnan takia. Rakenteet pystytään tuottamaan tehtaassa, säältä suojassa ja optimi olosuhteissa. Paikalla rakentaminen on vaikeampaa Suomen ilmastosta johtuen. Eniten paikalla rakentamista haittaa sade, pakkanen ja rakennuksen ominaisuudet eli rakennuksen korkeus. Rakennuksen tekeminen on myös nopeampaa, koska valmiselementeissä ei tarvitse ottaa huomioon kovettumisaikoja työmaalla, toisin kuin paikallavalu rakentamisessa.

Kerrostalojen julkisivuissa käytetään paljon betonia. Yleisimmät betonipinnat ovat ruis-
kurapattu ja pesubetoni. Myös betonin väriä voidaan muuttamalla lisäämällä betonimas-
saan väripigmenttejä.

2.2 Betonimassa

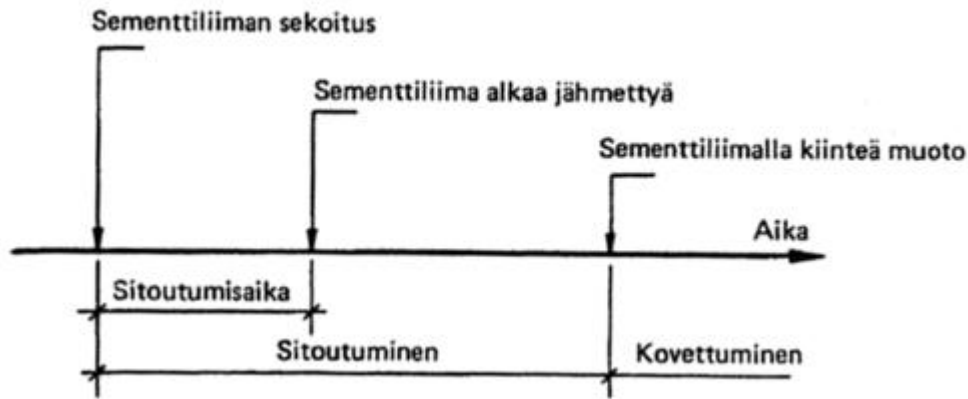
Betonimassa koostuu runkoaineesta, sideaineesta ja vedestä. Runkoaineena on filleriä, soraa ja sepeliä. Kun nämä kiviainekset yhdistetään oikeassa suhteessa, saadaan betonille yhtenäinen ja toimiva rakenne. Sideaineena on pääosin sementtiä, mutta seosaineena voidaan myös käyttää sementin kanssa masuunikuonaa, silikaa ja lentotuhkaa. Sementti tehdään kalkkikivestä. Kalkkikivi jauhetaan ja kuumennetaan jopa 1500 °C:een. Tästä saadaan neljää eri päämineraalia, joiden suhteita säätelemällä pystytään vaikuttamaan sementin ominaisuuksiin. (Betonitekniikan oppikirja by 201 2004, 28.)

Käytettävän veden täytyy olla puhdasta, eikä se saa sisältää kasvi- ja eläinkunnan lahoamisjätteitä eli humusaineita tai sokeria. Nämä aiheuttavat betonimassassa kovettumisen hidastumista sekä lujuuden menetyksiä. Sementti ja vesi muodostavat kemiallisen reaktion josta syntyy liimaa, joka yhdistää kiviainekset toisiinsa. Kovettunutta sementtiä kutsutaan sementtikiveksi. (Betonitekniikan oppikirja by 201 2004, 37, 75.)

2.2.1 Betonimassan ominaisuudet

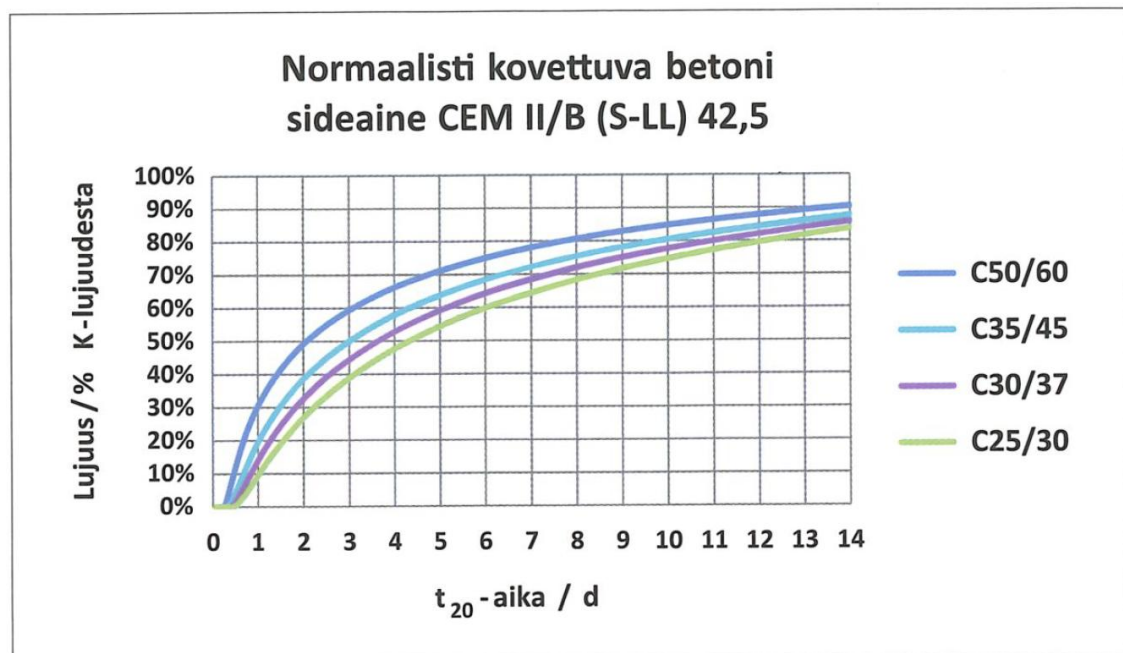
Betonimassan täytyy kovettua ja oikein tiivistettynä sen täytyy täyttää sille annetut vaatimukset lujuuden suhteen. Massalla on myös oltava työstettävyyden ominaisuus, jota mitataan painumakokeella. Painumaa käsitellään kohdassa 4.2. Betonimassa alkaa sitoutua, mutta se ei ala välittömästi. Tavallisesti tähän kuluu 1–4 tuntia. (Betonitekniikan oppikirja by 201 2004, 69.)

Sitoutumisen alkamiseen vaikuttaa voimakkaasti lämpötila. Lämpötilan laskiessa 10 °C sitoutuminen hidastuu noin puoleen. Ennen sitoutumista betonimassa on lapiolla käsiteltävää ja juoksevaa. Sitoutumisreaktion tunnistaa, kun betonimassa alkaa jähmettyä ja muuttua kiinteään muotoon. Massaa pystyy työstämään pinnasta ja pintaa pystytään tekemään viimeistely. Tavallisesti karkean pinnan viimeistely tapahtuu hiertämällä pintaa käsin polyuretaani hiertimellä tai koneellisesti metallilautasella. Jos pinnasta tulee sileä, sitä viimeistellään teräslaatalalla tai koneellisesti betonihiertimellä. Sitoutumisen jälkeen kovettuminen alkaa tavallisesti 2–8 tunnin kuluttua valusta. Selvää rajaa sitoutumisella ja kovettumisella ei ole. Kuvassa 1 on esitetty sementin sekoittumisesta, kovettumisen alkamiseen ajallisesti. (Betonitekniikan oppikirja by 201 2004, 51, 69, 75.)



KUVA 1. Sementtiliiman sitoutuminen ja kovettuminen (Betonitekniikan oppikirja by 201 2004, 53).

Kovettuminen kestää ajallisesti pitkään. Betonin sanotaan kovettuvan koko sen käyttöön, mutta käytännössä kahden kuukauden jälkeen lujuuden kehitys on minimaalista ja lähes pysähtynyttä. Laskennallisesti betoni saavuttaa loppulujuutensa 28 päivän jälkeen. Tällöin sen lujuus on saavuttanut loppulujuudestaan 90–95 prosenttia. Kuvassa 2 on esitetty betonin kovettumisen kehittyminen. Kuvan sementtinä toimii yleisesti käytettävä Plus-sementti, joka sisältää masuunikuonaa.



KUVA 2. Betonin lujuudenkehitys (Betonitekniikan oppikirja by 65 2012, 74).

Tavalliset betonin puristuslujuudet ovat 30–60 N/mm², mutta korkealujuusbetoneilla eli High Performance Concrete, päästään jopa 80–120 N/mm² puristuslujuuksiin. Tämä mahdollistaa pienemmät massamenekit ja rakenteiden poikkileikkausmitat.

Betonin kovettuessa syntyy hydrataatioreaktion avulla lämpöä. Sementtien hydrataatiolämmöt vaihtelevat noin 250–400 kJ/kg välillä seitsemässä vuorokaudessa. Hitaimmilla sementeillä lämmöntuotto on pienempää kuin nopeimmilla sementeillä. Tämän seurauksena betonimassan lämpötila nousee 0–8 °C olosuhteista riippuen. Talvibetonoinnissa nopeammilla sementeillä saadaan jäätymislujuus saavutettua nopeammin. Jäätymislujuuden minimiarvo on 5 N/mm². Massaa voidaan myös tilata nopeammilla sementeillä, jotta saavutetaan suurempi hydrataatiolämpö ja tämän lämmön avulla saavutetaan jäätymislujuus. Betonin saavuttaessa jäätymislujuuden se voi jäätyä menettämättä lujuuden kehitystään. (Betonitekniikan oppikirja by 201 2004, 56, 85–86.)

2.2.2 Palonkesto-ominaisuus

Betoni on kestävä materiaali tulipaloa vastaan. Paloluokkia säätelee Suomen rakentamismääräyskokoelma E1. Paloluokkia on P1, P2 ja P3, joista P3 on vaativin. Todelliseen rakenteen kestoon vaikuttaa tulipalon voimakkuus, jakautuminen, mahdollinen hapensaanti, pilarin tai palkin koko, sekä palotilan koko, muoto ja ominaisuudet. (Betonitekniikan oppikirja by 201 2004, 107. Rakennusten paloluokitus, RakMK E1 – Finnisol.)

Usein tulipalon lämmönkehitys on alkuvaiheessa maltillista. Lämpöä kehittyy lisää ja lämpötilan nouseminen on tasaista. Palon ohitettua leiskahduspisteen, sen lämpötilan nousu on todella nopeaa ja palon lämpötila voi nousta yli 1000 °C asteeseen. Betonin lämmitessä 200 °C ja viilentyessään hitaasti takaisin käyttölämpötilaan se menettää 25% alkuperäislujuudestaan. Betonin lämpötilan noustessa 800 asteeseen, sen puristuslujuus on 40% alkuperäisestä. Sulamispistettä betonille voidaan pitää 1300 asteessa. Betoni ei pala tai levitä haitallisia kaasuja. (Betonitekniikan oppikirja by 201 2004, 108, 111.)

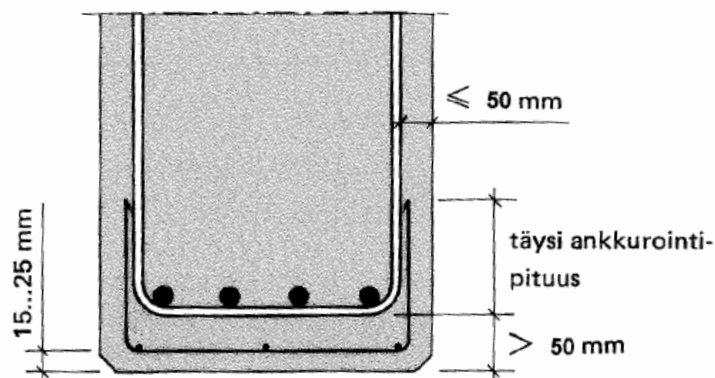
Tulipalotilanteessa täytyy tarkastella koko teräsbetonirakennetta. Palon kestävyyttä saadaan teräsbetonirakenteisiin lisäämällä betonin suojaaksuutta teräksille. Betonilla on paljon massaa ja se pystyy näin vastaanottamaan kuumuutta. Tämän ansiosta hetkelliset kuumuuspiikit eivät vaikuta ja betonin sisäosa pysyy viileämpänä. Betonin ja teräksen lämpölaajenemiskertoimet ovat lähes samoja. Tämän ansiosta rakenne toimii, vaikka lämpötila muuttuu oleellisesti. Betoninpeitteen lisäksi, täytyy raudoituksen pysyä pai-

koillaan ja vahingoittumattomana rakenteen toimivuuden kannalta. Tulipalo aiheuttaa betoniin mikrohalkeamia, mitkä johtuvat sementissä olevista lämpölaajenemisominaisuuksista. (Betonitekniiikan oppikirja by 201 2004, 108–111.)

Teräsrakenteissa onttoja teräspilareita valetaan täyteen betonilla, jotta saadaan paloluokitukset täytettyä. Täyteen valettu teräspilari pystyy vastaanottamaan kuumuutta hyvin ja näin siihen ei tule muodonmuutoksia helposti. Pilarin sisällä oleva betoni kuumenee hitaasti ja vastaanottaa puristusta. Jos teräspilari olisi ontto, sen teräspinta lommahtaisi helposti kuumuuden ja kuormien yhteisvaikutuksesta.

Suuri ongelma tulipalossa on myös betonin lohkeilu. Lohkeilua lisää korkea kosteuspiitoisuus, pintojen suuret lämpötilapintojen erot, suuri puristusjännitys ja nopea lämpötilan nousu. Korkea kosteuspiitoisuus lisää suuresti betonin halkeilua, varsinkin palon alkuvaiheessa. Betonissa oleva vesi höyrystyy nopeasti lämpötilan nousun vaikutuksesta. Höyryn paine aiheuttaa lohkeamisen. Tavallisesti tämän tyyppinen lohkeilu aiheuttaa voimakkaan äänen. (Betonitekniiikan oppikirja by 201 2004, 113–114.)

Lohkeilun estäminen ja rakenteen toimivuuden suojaaminen tapahtuu suojabetonipeitteen paksuutta lisäämällä. Suojabetonin kasvaessa yli 50 mm vahvaksi tarvitsee se lisäraudoituksen lohkeamista vastaan. Lisäraudoituksen minimi halkaisija on 2,5 mm. Kuvassa 3 on esitetty lisäraudoituksessa tavanomaisesti käytetty toteutustapa. (Betonitekniiikan oppikirja by 201 2004, 114.)



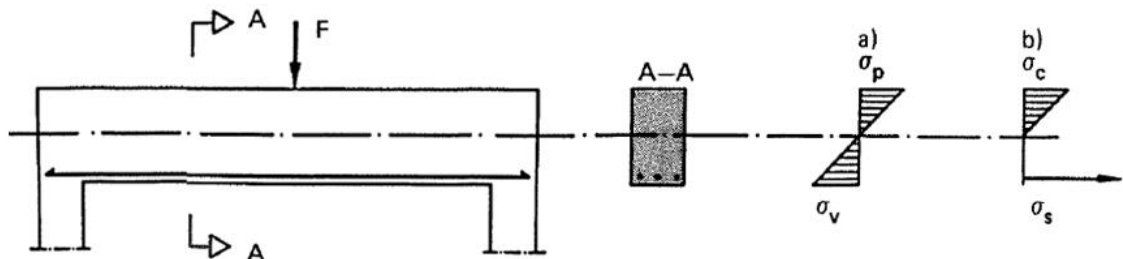
KUVA 3. Palkin alapintaan on piirretty lisäraudoitus lohkeilunestämiseksi tulipalossa. (Betonitekniiikan oppikirja by 201 2004, 114).

2.3 Teräsbetoni ja sen toimintaperiaate

Teräsbetoniksi kutsutaan rakennetta, jossa käytetään betonia sekä terästä ja ne muodostavat yhdessä rakennekokonaisuuden. Betonin ja teräksen yhteistoiminnalla saadaan tehtyä vaakarakenteita. Tämä mahdollistaa tilojen tehokkaamman käytön.

Pelkällä betonilla pystytään rakentamaan holvikaaria ja niiden avulla saadaan tehtyä rakennuksia. Monet vanhat kirkot ovat rakennettu holvikaarien avulla. Muodot ovat puristekaaria ja niihin ei tule vetoa. Betoni kestää puristusta $30\text{--}60\text{ N/mm}^2$, mutta vetolujuus on noin kymmenes osata puristuslujuudesta. Tästä syystä terästä käytetään betonissa, eli ottamaan syntyvät vetovoimat. Betonilla ja teräksellä on sama lämpölaajenemiskerroin. Tämän ansiosta laajeneminen tapahtuu yhtenäisesti aiheuttamatta vaurioita rakenteeseen.

Harjateräs, jota lähes aina käytetään betonissa, kestää vetoa hyvin. Harjateräksen vetolujuus on normaalisti 500 N/mm^2 ja sen vetolujuus on yli 100 kertaa parempi kuin betonilla. Harjateräs ottaa vastaan vetojännityksiä ja ankkuroituu betoniin harjoilla, jotka on valssattu terästankoon sen tekovaiheessa tai terästangon päähän taivutetulla koukulla. Myös molekyylit ja kitka muodostavat lisätartuntaa teräkselle. Harjateräksessä olevat harjat tarttuvat betoniin ja siirtävät vetojännitykset betoniin. Suunnittelussa on huomioitava riittävän pitkä ankkurointi- ja jatkospituus. Jännitykset on saatava siirrettyä betoniin vahinkoa aiheuttamatta. Väärät jatkos- ja ankkurointipituudet aiheuttavat betonissa halkeilua ja pahimmillaan rakenteen sortumisen. Kuvassa 4 on esitetty yksiaukkoisen betonipalkin taivutusjännitystila. (Betonitekniiikan oppikirja by 201 2004, 250.)



KUVA 4. Teräsbetonipalkin taivutus (Betonitekniiikan oppikirja 2004 by 201, 243)

Kuvassa 4 on yksiaukkoinen betonipalkki, johon on kohdistettu pistemäinen voima aukon keskelle. Palkille muodostuvat sisäiset momenttivoimat on esitetty kohdassa a. Leikkaus A–A on palkin poikkileikkaus. Alapintaan on piirretty teräs, joka on kuvattu yhtenäisellä viivalla. Merkinnät Q_p tarkoittaa yläpintaan tulevaa puristusta ja Q_v on alapintaan tulevaa vetojännitystä. Keskellä katkoviivan kohdalla on neutraaliakseli. Kohdassa b on esitetty voimien siirtyminen teräsbetonipalkissa. Betoni vastaanottaa puristusjännitykset Q_c ja teräs ottaa kaiken vetojännityksen Q_s . (Betonitekniikan oppikirja by 201 2004, 243.)

2.4 Yleinen kuvaus sementeistä, laaduista ja seossementeistä

Suomessa käytetään pääsääntöisesti viittä eri seossementti tyyppiä. Päälajit jaetaan edelleen eri sementtilajeihin käytetyn seosaineen ja seosainemäärien perusteella (By 201, 42).

Lähes pelkkää klinkkeriä sisältävä sementti on merkitty CEM I –merkillä. Klinkkeri on sementin pääraaka-aine. Sementistä sementtiklinkkeriä on 95–100 prosenttia. Seossementit on merkitty esimerkiksi CEM II –merkillä. Merkinnän jälkeen on kirjaimilla merkitty muut sementin sisältämät aineet. Aineet, niiden seossuhteet ja merkinnät on tarkemmin esitetty taulukossa 1. Muita sementin sisältämiä sideaineita on masuunikuona, silika, lentotuhka ja kalkkikivi. Muiden sideaineiden määrä on pääsääntöisesti 6–35 prosentin välillä sementin määrästä. (Betonitekniikan oppikirja by 201 2004, 42–43.)

Pääsääntöisesti Suomessa käytetyt seossementit ja niiden merkinnät on listattu seuraavasti koostumuksen perusteella:

CEM I	Portlandsementti
CEM II	Portlandseossementti
CEM III	Masuunikuonasementti
CEM IV	Pozzolaaniseimentti
CEM V	Seossementti

Sementtien lujuusluokkia on kolme. Ne ovat 32,5, 42,5 ja 52,5. Arvoilla tarkoitetaan sementin puristuslujuutta 28 vuorokauden iässä. Puristuslujuuden yksikkönä käytetään N/mm^2 . Lisäksi jokainen lujuusluokka jaetaan kahteen varhaislujuusluokkaan. Varhaislujuusluokat ovat normaali varhaislujuus (N) ja korkea varhaislujuus (R). Varhaislujuudella tarkoitetaan lujuuden kehittymistä alussa. Varhaislujuus on oltava 42,5 N sementillä ylitse 10 N/mm^2 kahden vuorokauden jälkeen. Taulukossa 2 esitetään sementeille asetetut lujuus- ja varhaislujuus vaatimukset. (Betonitekniiikan oppikirja by 201 2004, 43–44.)

TAULUKKO 1. Suomalaisen sementtien koostumukset (By 201, 43).

Sementtilaji	Koostumusvaatimukset [%]					
	klinkkeri	kuona	silika	lentotuhka	kalkkikivi	muut
CEM I	95...100	–	–	–	–	0...5
CEM II/A-S	80...94	6...20	–	–	–	0...5
CEM II/B-S	65...79	21...35	–	–	–	0...5
CEM II /A-D	90...94	–	6...10	–	–	0...5
CEM II/A-V	80...94	–	–	6...20	–	0...5
CEM II/B-V	65...79	–	–	21...35	–	0...5
CEM II/A-LL	80...94	–	–	–	6...20	0...5
CEM II/A-M	80...94	6...20				0...5
CEM II/B-M	65...79	21...35				0...5
CEM III/A	35...64	36...65	–	–	–	0...5
CEM III/B	20...34	66...80	–	–	–	0...5

TAULUKKO 2. Sementtien varhais- ja standardilujuus vaatimukset. (By 201, 44).

Lujuusluokka	Puristuslujuus [MPa]			
	Varhaislujuus		Standardilujuus	
	2 vrk	7 vrk	28 vrk	
32,5 N	–	$\geq 16,0$	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
32,5 R	$\geq 10,0$	–		
42,5 N	$\geq 10,0$	–	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
42,5 R	$\geq 20,0$	–		
52,5 N	$\geq 20,0$	–	$\geq 52,5$	–
52,5 R	$\geq 30,0$	–		

2.5 Lisäaineet

Notkistimet ovat pinta-aktiivisia aineita, jotka parantavat betonin pumpattavuutta, työstettävyyttä, mahdollistavat pienempien vesi-sementtisuhteiden käytön sekä korkealujuisten betonien teon. Notkistimilla saadaan tyypillisesti 5–15 prosentin ja tehonotkistimilla 12–30 prosentin veden vähennys. Notkistimen toiminta riippuu myös sementistä, seosaineista, hienoainemäärästä, lämpötilasta sekä sekoitustehosta. Yleensä notkistimien käytetty määrä on 0,5–2 prosenttia sideaineen määrästä. Notkistimia on neljää eri raaka-aineeseen perustuvia tyyppiä, lignosulfonaatti, melamiini, naftaleeni ja polykarboksyyliesteri. (Betonitekniikan oppikirja by 201 2004, 64–65.)

Huokostimet muodostavat betoniin ilmaa 4–8 prosenttia. Tavallisesti betonissa on ilmaa 1–2 prosenttia eli 10–20 litraa kuutiota kohden. Huokostimen tehtävänä on tuottaa pieniä ilmakuplia tasaisesti betonin huokosiin. Huokostettu betoni kestää pakkasta, eikä ala halkeilla. Halkeilun syynä on betonissa oleva vapaa vesi. Veden jäädyttyä se laajenee ja tuottaa betonin sisälle painetta. (Betonitekniikan oppikirja by 201 2004, 66–67.)

Huokostettussa betonissa vesi pääsee laajenemaan ilmahuokosiin eikä aiheuta painetta betonin sisällä. Suojahuokosten koon tulisi olla sopiva ja niiden välimatka riittävän lyhyt. Huokostin annostukset ovat 0,01–0,03 prosenttia sideaineen määrästä. Huokostus myös notkistaa betonia ja alentaa betonin vetolujuutta. On myös huokostettua P-lukubetonia, joka kestää toistuvaa jäätymis-, sulamis- ja suolarasitusta. (Betonitekniikan oppikirja by 201 2004, 66–67.)

Hidastin hidastaa betonin sitoutumista ja sillä saadaan työstettävyys aikaa pidemmäksi. Tämän avulla saadaan mahdollistettua pitkät kuljetusmatkat tai kesällä saadaan hidastettua kuumuuden aiheuttamaa nopeaa sitoutumista. Talvisin liian nopeasta sitoutumisesta ei ole huolta. Hidastinta käytetään 1–3% sideaineen määrästä ja annostus riippuu tarvittavasta hidastusajasta. (Betonitekniikan oppikirja by 201 2004, 67.)

Kiihdyttimiä käytetään, kun betonin täytyy saavuttaa nopeammin jäätymislujuus tai tarvitaan nopeampaa betonin kovettumista. Nopeammalla kovettumisella saadaan muotikiertoa parannettua. Tätä käytetään esimerkiksi elementtitehtailla. Nykyään talvibetonoinnissa käytetään paljon kiihdyttimen tilalla nopeampaa sementtiä tai lämmitettyä betonia näiden ominaisuuksien saamiseksi. (Betonitekniikan oppikirja by 201 2004, 68.)

2.6 Lisäaineen CE-merkki

Lisäaineilla tulee olla CE-merkki tai ne on oltava ennen käyttöä testattuja ja hyväksytyjä. Niistä täytyy olla selvitys ominaisuuksista, vaikutuksesta ja käyttökelpoisuudesta. Kokeet on tehtävä Suomessa käytettyjen sementtien kanssa. Valmistajan käyttöohjeet tarkistetaan. Käyttöohjeilla varmistetaan, että lisäaineella saadaan haluttu lopputulos. Lisäaineelle on oltava selvitettyinä sivuvaikutukset. (Betonitekniikan oppikirja by 201 2004, 64.)

2.7 Hintatietoa lisäaineista

Lisäaineiden hintatietoja ei ole helposti saatavilla yksityiselle kuluttajalle. Betonien ohjeelliset hinnat ovat vapaasti yksityisten käytössä. Hinoissa on myös kerrottu kuinka paljon notkistetut, hidastetut tai säänkestävät betonit maksavat normaalia betonia enemmän. Tästä voidaan laskea betonin sisältävien lisäaineiden arvioitu hinta, joka myös sisältää ennako- ja laadunvalvontakokeiden hinnan. Tavallisesti notkistavia lisäaineita laitetaan betoniin 0,5–2 prosenttia tai huokostinta 0,01–0,03 prosenttia sideaineen määrästä. Sideaineen määräksi voidaan olettaa 320 kg/m³. Kiviaineksen ja veden lämmityslisä on otettu mukaan taulukko kolmoseen, koska talvibetonointi työssä se on oleellinen lujuuden kehittymisen kannalta.

TAULUKKO 3. Betonin lisäaineiden arvioidut hinnat. (Rudus 2016, Lujabetoni 2013)

Lisäaineet / Lisähinnat						
Lisäainetyyppi	Rudus / Etelä-Suomi 2016		Lujabetoni 2013		Lisäaineen kilohinta euroina, alv 0%	
	Lisähinta €/m ³ 0% alv.		Lisähinta €/m ³ 0% alv.		Rudus	Lujabetoni
Betonin perushinta k40	135		130			
Notkistettu (NL)	1 nlk	6,26	9,24		3,91	5,78
	2 nlk	9,34	12,38		5,84	7,74
	3 nlk		17,23			10,77
Hidastettu betoni						
Sitoutumisen siirto 3-12 h	8,48		10,4		5,30	6,50
Säänkestävät						
Pakkasrasitus	XF1	14,14	15,34		44,19	9,59
P-lukubetonit						
Pakkasen ja suolan rasitus	XF2, XF4	30,3	32,18		63,13	20,11
	XF2, XF4	35,35	35,24		73,65	22,03
	XF2, XF4	40,4	38,46		84,17	24,04
Kuumabetoni	1 LK 20-30°C	6,06	7,97		12,63	4,98
	2 LK 30-40°C	10,1	11,15		21,04	6,97
Kiviaineen lämmityslisä	6,06		6,26		12,63	3,91

3 VALMISTUSSUUNNITELMA

3.1 Kiviaines

Kiviaines tilattiin Ruduksen kautta. Toimittajana oli Pihapojat Oy. He säkittivät kiviainekset ja toimittivat ne noin kuution suursäkeissä. Kiviainekset ovat samoista paikoista peräsin kuin Ruduksen käyttämät kiviainekset.

Kiviaineksia tilattiin kolmea eri lajiketta. Filleriä, joka on kaikista hienojakoisinta ja fillerin raekoko on 0,063 mm tai pienempi. Soraa, joka on hienoa, mutta karkeampaa kuin filleri. Soran raekoko on 0,5–4 mm välillä. Filleri ja sora ovat luonnon muokkamia pyöreitä rakeita, joita on saatu harjasta. Viimeisenä kiviaineksena on sepeli. Sepeli on todella karkeaa filleriin ja soraan nähden. Käsien tunnisteltuna sepeli ei pyöri sormissa, eikä tunnu liukkaalta. Sepeli on kalliosta murskattua kiviainesta ja sen muodot ovat kulmikkaita. Sepelin raekoko on 8–16 mm välillä.

Kiviaines toimii betonin runkoaineena. Se muodostaa oikein suhteutettuna tiiviin kokonaisuuden betoniin, jossa sementti toimii kiviainesten liimana. Jos kiviaines sisältää humusaineita se ei sovellu betonissa käytettäväksi. Humusaineet hidastavat ja vähentävät betonin kovettumista. Humuspitoisuus määritetään humuskokeella. Kokeessa käytetään 3 prosenttista natriumhydroksidiliuosta. Kiviaines natriumhydroksidiliuokseen, jonka jälkeen vesi värjäytyy tummemmaksi. Tummuusasteen perusteella määritellään kiviaineksen humuspitoisuus. (Betonitekniikan oppikirja 2004, 37 ja Betonin kiviainekset 2008, 27.)

Suomalainen graniittipohjainen kiviaines on usein sopivaa betonin runkoaineeksi. Kiviaineksen kiintotiheyden ollessa 2000–3000 kg/m³ se luokitellaan normaaliksi kiviainekseksi. Kiviaineet, jotka ovat hauraita, helposti rappeutuvia tai huokoisia eivät sovellu betoniin. Nämä ominaisuudet heikentävät betonia. (Betonitekniikan oppikirja 2004, 38 ja Betonin kiviainekset 2008, 23.)

3.1.1 Seulonnat

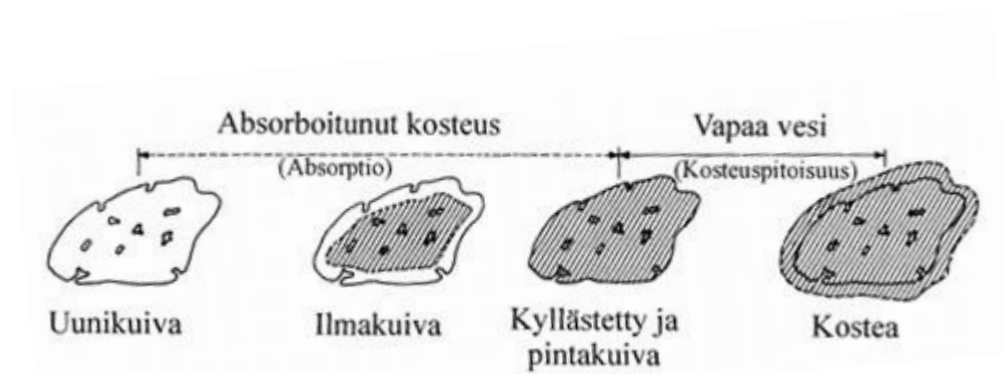
Seulonta määrittää kiviainesten rakeiden koon. Normaalien seulojen silmäkoot ovat 0,125, 0,25, 0,5, 1, 2, 4, 8, 16, 31,5, 63 mm. Seulonnan avulla saadaan määritettyä rakeisuuskäyrät. Käyrien avulla määritetään kiviainesten suhteet.

Seulontojen tulokset, joita testeissä on käytetty, ovat pääosin Ruduksen tekemiä. Seulonnassa kiviaines kaadetaan seulasarjan läpi. Seuloja tärytetään ja näin hienoaines valuu pohjaa kohti. Kivirakeet, jotka ovat kyseessä olevan seulan silmäkoon tai hieman suurempia jäävät seulalle. Tärytyksen jälkeen jokaiselle seulalle jäänyt kiviaines punnitaan erikseen. Tästä lasketaan seulan läpäisyarvo.

3.1.2 Kosteus

Kiviaines sisältää vapaata vettä ja absorboitunutta kosteutta. Vapaan veden osuus vaihtelee suuresti kiviaineksesta, vuoden ajasta ja säilytyspaikasta. Usein kiviaines on märkää ja sisältää vapaata vettä, koska sitä säilytetään ulkona. Sade ja ilmankosteus vaikuttavat vapaan veden määrään. Kosteuspitoisuus määritetään kuivattamalla kiviaines uunissa +105 °C:ssa ja punnitsemalla se. Kiviaineen kosteuspitoisuus on haihtunut veden paino grammoina jaettuna kuiva-aineksen painolla ja kerrottuna sadalla. Tuloksena saadaan prosentteja.

Absorboitunut vesi jää kiviainekseen sen ollessa ilmakehässä. Kun kiviaines kuumennetaan, sen huokosissa oleva vesi poistuu. Jäljelle jäävä kiviaines ei sisällä yhtään vettä. Kuvassa 5 on esitetty, kuinka kiviaineksessa oleva kosteus ja vesi ovat eri olomuodoissa.



KUVA 5. Kosteuden olomuodot betonissa. (BY 201 s38).

Absorboituneen veden määrä vaihtelee eri kiviaineslajeilla. Taulukossa 4 nähdään kiviaineksen vapaanveden määrä ja absorboituneen kosteuden määrä prosenttiyksikköinä. Vapaan veden määrä on huomioitava betonin suhteutuksessa, jotta vesi-sementtisuhde pysyy haluttuna.

TAULUKKO 4. Kiviaineksen vesipitoisuus.

Kiviaineksen vesipitoisuus				
Kiviaines	Kokonais %	Absorboitunut %	Vapaa vesi %	Vapaa vesi kg / m ³
Filleri	6,1	0,4	5,7	7,1
Sora	4,3	0,3	4	31,2
Sepeli	0,7	0,1	0,6	5,2

Kokeissa käytetyt kiviainekset kuivattiin sähkökäyttöisellä liedellä. Kuivattu kiviainemäärä oli 2 kg. Kiviaines otettiin suursäkistä, jossa sitä säilytetään. Astia oli metallinen kulho, jonka paino punnittiin ennen kiviaineksen lisäämistä. Kulho laitettiin liedelle ja kiviainesta kuivatettiin. Kuivatus kesti noin 20 minuuttia, jolloin kaikki vesi oli poistunut kiviaineksesta. Lopuksi punnittiin kiviaineksen paino ja laskettiin kokonaisveden määrä prosentteina suhteessa kuivaan kiviainekseen. Filleri sisältää eniten vapaata vettä sen pienen rakeen ja hienon koostumuksen takia.

3.2 Rakeisuusluku

Suomessa käytetään tavallisesti talonrakennusalalla Nykäsen-suhteutus menetelmää. Se on helppokäyttöinen, soveltuu tavallisesti käytettyihin betonilaatuihin ja sen avulla voidaan hallita keskeisimmät seikat betonin suhteutuksesta.

Rakeisuusluku (H) tarkoittaa yhdistettyjen kiviainesten erisuuruisten rakeiden painosuhteita. Rakeisuusluku vaihtelee 350–650 välillä ja sillä ei ole yksikköä. Rakeisuusluku-
taulukon avulla nähdään betonin kiviainesten jakauma, kuinka paljon betonimassa sisältää hienoa kiviainesta tai vastaavasti karkeaa. Mitä pienempi rakeisuusluku on, sitä suurempi rakeisempaa betonimassassa oleva kiviaines on. Kokeessa olevan betonimassan rakeisuusluku on 495. Taulukossa 5 on laskettu rakeisuusluku.

TAULUKKO 5. Rakeisuusluku

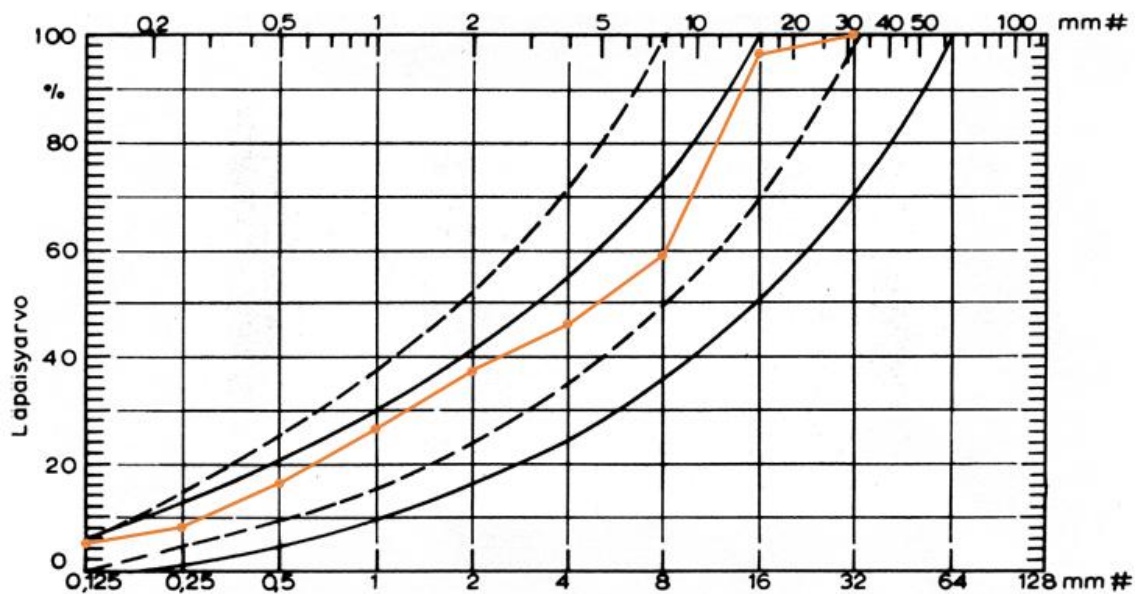
Kiviainekset		Hu- mus	Lie- te	Rakeisuus									H		
				0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32		64	
a	Filleri			31	59,6	86,7	96,4	98,6	100	100	100	100	100	872,4	
b	Sora			5	10	22	45	69	87	99	100	100	100	637	
c	Sepeli			1	1	1	1	1	1	17	92	100	100	315	
d															
Kiviainesten yhdistäminen		a	7 %	2	4	6	7	7	7	7	7	7	7	61	
		b	44 %	2	4	10	20	30	38	44	44	44	44	280	
		c	49 %	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	8	45	49	49	154
		d	%												
Yhdistetty kiviaines				4,5	8,5	16,5	27,5	37,5	45,5	59	96	100	100	495	

Kiviaineksina ovat filleri, sora ja sepeli. Käytetyt seulat ovat 0,125–63. Luvut, jotka ovat läpäisseet seulat on kirjattu seulan koon alapuolelle prosentteina. Selventävänä esimerkkinä, soraa on läpäissyt 2 mm seulasta 69 prosenttia. Lopussa ylimmäisenä on (H), joka on vaakarivin yhteenlaskettu summa.

Kiviainesten yhdistäminen -kohdassa on päätetty käytettävät suhteutusprosentit. Suhteutusprosentit vaikuttavat kiviainesten muodostamaan rakeisuuskäyrään, jota käsitellään seuraavalla sivulla. Suhteellinen rakeisuus on laskettu, läpäisyprosentti kertaa käytetty suhteutusprosentti. Esimerkkinä soran läpäisyprosentti 2 mm seulalle on 69 prosenttia, tämä kerrotaan käytetyllä suhteutusprosentilla 44 prosentilla ja tulokseksi saadaan 30. Alimmaiselle riville on laskettu yhteen kaikkien kiviainesten suhteellinen rakeisuus. Tuloksena saadaan kaikkien kiviainesten yhdistetty seulojen läpäisyprosentti. Rakeisuusluku (H) on yhdistettyjen kiviainesten summa, joka on tässä 495.

Kaaviota 1 kutsutaan kiviaineksen rakeisuuskäyräksi. Keltaisella viivalla kuvataan tässä työssä käytetyn kiviaineksen rakeisuutta. Käyrän muoto ja sijainti kuvaavat kiviaineksen raejakautta. Notkahdusta 4 mm ja 8 mm seulojen kohdalla ei pysty muuttamaan. Notkahdus johtuu kiviaineksista ja niiden raejakautasta. Lopussa oleva hyppy 16 mm seulalta 32 mm seulaan johtuu seulontojen arvoista, jossa oletetaan, että sepelissä olisi 32 mm kivirakeita 8 prosenttia sepelin määrästä. Kaaviossa olevat katkoviivat ja viivat ovat optimi kiviainesten raejakautia maksimissaan 16 mm ja maksimissaan 32 mm raekoolle.

KAAVIO 1. Kiviaineksen rakeisuuskäyrä



3.3 Sementti

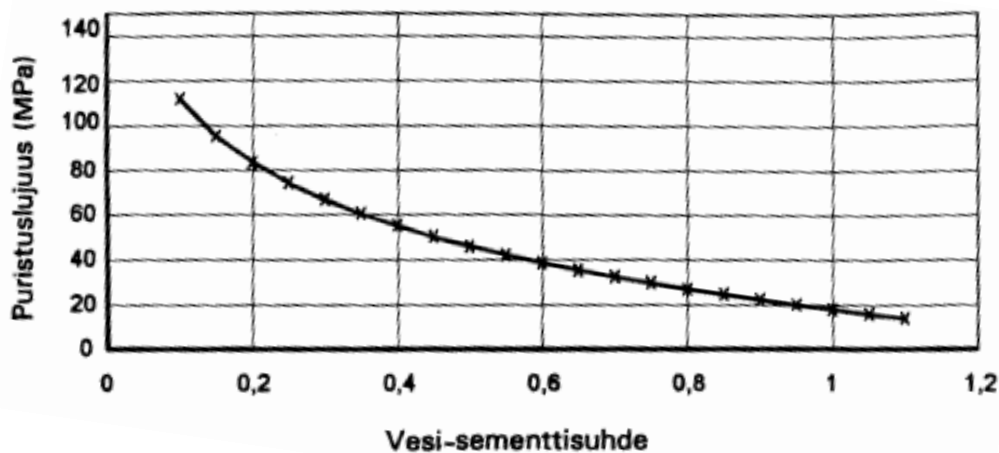
Kokeissa käytettiin Finnsementin suomalaisia sementtejä ja Embran maahantuomia sementtejä. Finnsementin on CEM II /A-LL 42,5 R. Mikä tarkoittaa puristuslujuutta seitsemän vuorokauden jälkeen $42,5 \text{ N/mm}^2$ ja varhaislujuus kahden vuorokauden jälkeen on oltava ylitse 20 N/mm^2 . CEM II/A-LL tarkoittaa portlandseossementtiä ja se sisältää kalkkikiveä 6–15 prosenttia klinkkerin lisäksi. (Finnsementti – Rapidsementti 2016)

Embran sementti oli laadultaan CEM I eli portlandsementtiä. Sementti sisältää vain klinkkeriä, jota on lähes sata prosenttia. Se voi sisältää muita sivuaineita enintään viisi prosenttia.

3.4 Suhteutus ja vesi-sementtisuhte

Vesi-sementtisuhte vaikuttaa voimakkaasti betonin ominaisuuksiin. Suhde tarkoittaa veden määrää sementin määrästä. Suuri veden määrä huonontaa lujuuutta ja tekee betonin kutistumisesta suurempaa. Hyvänä ominaisuutena betonin työstettävyys paranee ja sitoutumisreaktio viivästyy. Taulukosta 6 nähdään kuinka veden määrän pienentyminen vaikuttaa betonin puristuslujuuteen. Suhteen laskiessa alle 0,5 tulee betonimassan työstettävydestä vaikeaa ja vaatii notkistinta. (Betonitekniiikan oppikirja by 201 2004, 53–54.)

TAULUKKO 6. Vesi-sementtisuhteen vaikutus puristuslujuuteen (By 201, 54).



Betonin suhteutus tapahtuu suhteutuskäyvän avulla. Käyvän avulla tarvitaan rakeisuusluku, haluttua painumaa, sepelin prosenttimäärää, tavoitelujuuutta ja haluttua ilmamäärää. Käyvällä ei pystytä huomioimaan notkistimen aiheuttamaa veden vähennystarvetta. Veden vähennystarve riippuu notkistimesta ja sen määrästä.

Ennen kokeiden alkamista, sovittiin tavoitepainumaksi 150–180 mm, sementin määräksi 350 kg/m^3 , notkistimen määräksi 0,7 prosenttia ja vesi-sementtisuhteeksi 0,5. Tällöin massa olisi hyvin työstettävissä ja vesi-sementtisuhte olisi pieni, jolloin ei tulisi kuivumisesta johtuvaa kutistumista. Ensimmäisen kokeen jälkeen nostettiin vesi-sementtisuhte 0,57 ja notkistimen määrä 0,9 prosenttiin, jotta massaa pystyisi työstämään. Oletettu vesi-sementtisuhte 0,5 oli liian pieni, jotta betonimassaa olisi saanut työstettyä.

Massaan lisättävässä lisäaineessa oli vettä kaksi kolmasosaa, jonka seurauksena vesi-sementtisuhde muuttui. Lisäaineen mukana tulevan veden määrä oli kahden prosentin annoksena 0,3 litraa ja neljän prosentin annostuksena 0,6 litraa. Kahden prosentin massan vesi-sementtisuhde on 0,585 ja neljän prosentin massan 0,60.

Sekoitusjärjestyksessä ensin lisättiin pyörivään myllyyn kaikki sora ja filleri, jonka jälkeen lisättiin puolet vedestä, sementti kokonaan ja puolet sepelistä. Sekoitukseen annettiin sekoittua noin minuutin ajan. Seuraavaksi myllyyn lisättiin, notkistin loppu veteen sekoitettuna sekä loppu sepeli. Viimeiseksi lisättiin kokeellinen lisäaine minkä jälkeen sekoitusta jatkettiin noin kaksi–kolme minuuttia, jotta massa olisi mahdollisimman tasa-laatuista. Kokonaisekoitus ajaksi tuli noin 6–8 minuuttia.

3.5 Lisäaineet Sem Flow ELE ja PCC

Sem Flow ELE:ä käytetään tehonotkistimena normaaleissa betoneissa, sekä betoneissa joissa on suuri sementti ja hieno kiviainespitoisuus. Notkistimen käyttö mahdollistaa pienemmän vesimäärän käytön. Sem Flow ELE:ä voidaan käyttää myös huokostimen kanssa. Etuina sillä on suuri notkistusteho, alkulujuuden parantuminen ja parempi työstettävyys. Annostelu on 0,4–2 prosentin välissä sementin määrästä. PH arvo on 7,0. Olomuotona on ruskea neste, joka voidaan sekoittaa suoraan sekoittimessa sekoitusveden kanssa. (Semtu)

PCC-näyte on valmistettu Valkeakoskilla ja kokeissa tutkitaan sen betoniin tuomia ominaisuuksia. Taulukossa 7 on PCC-näytteen mittaustiedot. Kuiva-ainespitoisuus EX-305 on 35,4 prosenttia ja EX-315 on 28,7 prosenttia.

TAULUKKO 7. Mittaustiedot PCC

Näyte ID	FP-EX305	FP-EX315
BET	13,7 m ² /g	19,6 m ² /g
ka%	35,40 %	28,70 %
pH	8,93	8,93
Johtokyky	4,72 mS/cm	3,80 mS/cm
Br100 (sp5)	1950 cP	1180 cP
Br50 (sp5)	3400 cP	2020 cP

4 KOKEET / TUTKIMUKSET

Tässä osiossa käsitellään tutkimusmenetelmiä. Kerrotaan mitä tutkimukset sisältävät ja kuinka tutkimukset tehdään.

4.1 Puristuslujuus

Betonin puristuslujuutta määritellään yksiköillä Newtonia neliömillille (N/mm^2) tai megapascalia (MPa). Yksiköiden suuruus on sama. Puristuslujuus on betonin tärkein ominaisuus. Tavallisesti betonin lujuudet ovat 30–60 N/mm^2 . Betonin lujuus vaihtelee, jopa samasta massa-annoksesta valmistetuilla kappaleilla. Syynä tähän on betonitöiden tekijä sekä raaka-aineiden ominaisuusvaihtelut. Ensisijaisesti raaka-aineen vaihtelu, koska luonnosta saatavat kiviainekset ovat harvoin tasalaatuisia.

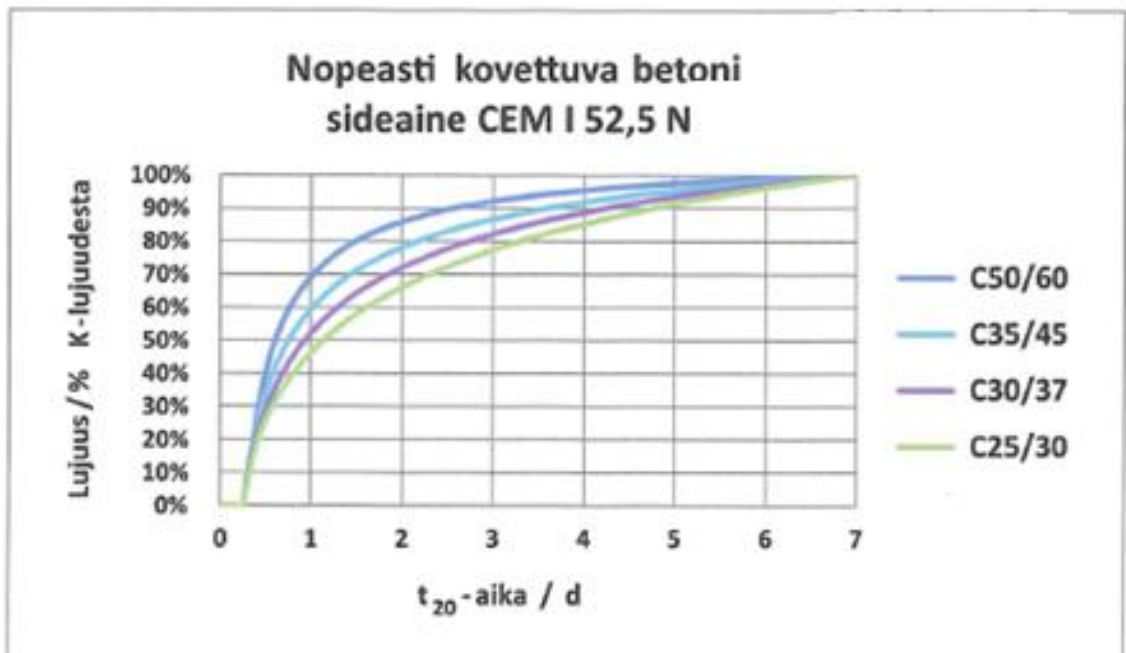
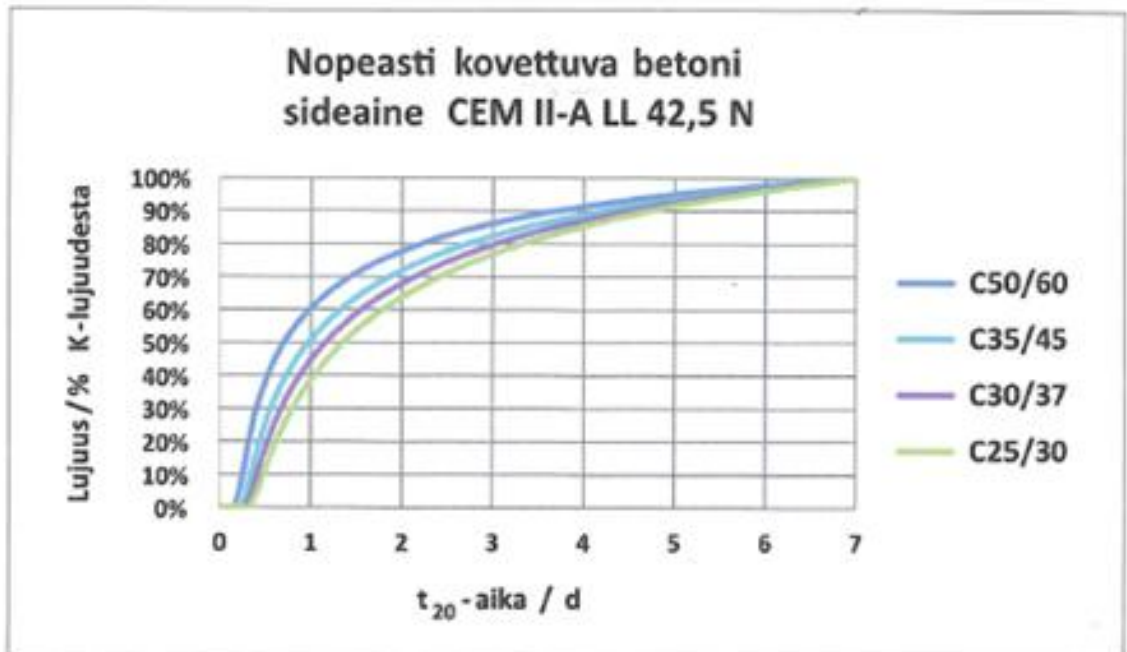
Koekappaleet ovat kooltaan 15 x 15 x 15 cm kokoisia. Muotteina on muoviset muotit, jotka on suunniteltu tähän käyttöön. Muotit öljytään ennen käyttöä, jotta betoni kappaleet on helppo irrottaa muotista. Muotin pohjassa on 8 mm kokoinen reikä. Reikä on teipattu valun ajaksi. Kun betonikappale irrotetaan muotista, puhalletaan pohjassa olevasta reiästä paineilmaa muotin sisälle ja kappale irtoaa helposti ja siististi muotista. Kappaleeseen ei tule halkeamia tai lohkeamia.

Lujuuden määrittäminen tapahtuu automatisoidulla hydraulipuristimella, jossa on digitaalinen painemittari. Puristin kertoo kappaleeseen kohdistuvan voiman, ilmoittaa huippulukeman ja laskee kappaleen kestävyuden N/mm^2 . Kuvassa 5 vasemmalla puolella on puristimen automatiikka yksikkö ja oikealla puolella puristin.



KUVA 5. Automatisoitu hydraulipuristin.

Lopullista puristuslujuutta voidaan arvioida Betoninormit by 65 –kirjan sivulta 75. Siellä on esitetty betonimassan ja sementtien yhteisvaikutuksesta tuleva lujuudenkehitys. Taulukossa on ensimmäisenä sylinteri puristuslujuus (C) ja jälkimmäinen kuutio puristuslujuus (K). Kuvasta 6 voidaan arvioida vuorokauden jälkeen olevien kappaleiden avulla tulevan betonimassan lopullinen puristuslujuus.



KUVA 6. Betonien lujuudenkehitys kypsyyksiän mukaan (Betoninormit by 65 2016, 75)

4.2 Notkeus

Notkeutta mitataan painumakokeella tai leviämänä. Notkea massa helpottaa betonointi työtä, mutta lisää kuivumisesta johtuvaa kutistumaa. Notkeuden mittaaminen painuma- tai leviämäkoneena tapahtuu painumakartion avulla. Painuma kartio on 30 cm korkea, alahaalta 20 cm ja ylhäältä 10 cm leveä metallinen työväline. Kuvassa 7 on painumakartio. Kartio tiivistetään mekaanisesti tiivistys sauvalla, joka on 2,5 cm paksu, umpinainen metallisauva. Kartio on kasteltava ennen kokeen aloittamista, jotta painumakartion reunat eivät imisi kosteutta betonista.

Painumakartion täyttö tehdään kolmessa osassa, yksi kolmasosa kerrallaan. Jokaisen täytön jälkeen betonia tiivistetään painamalla metallisauvalla 25 kertaa edelliseen täyttöön asti. Tiivistys painamisia tulee yhteensä 75 kertaa. Viimeisen tiivistyskerran jälkeen täytetään kartio yläpinnan kanssa samaan tasoon. Tiivistyksen aikana täytyy huolehtia, että kartio ei pääse nousemaan tai liikkumaan. Kartiossa on metalliset korvat, joiden päällä voi seistä ja näin estää kartion liikkumisen.

Kartion ollessa täysi ja tiivistetty, se nostetaan suoraan ylöspäin. Betonin valahtaessa alaspäin määräytyy painuma. Painuma on kartion yläpinnan ja valahtaneen betonin välinen erotus. Mittauspiste on keskeltä valahtanutta betonia. Leviämää mitatessa kaikki toimenpiteet ovat samoja, mutta mitan kanssa mitataan betonin leviämää. Leviämän suuruudet vaihtelevat 300 mm:stä yli 600 mm:in. Taulukossa 8 on esitetty painuma-leviämä luokat, sekä niiden raja-arvot.

TAULUKKO 8. Painuma- ja leviämä luokat ja arvot

Painumaluokat		Leviämäluokat	
Luokka	Painuma (mm)	Luokka	Leviämän halkaisija (mm)
S1	0-40	F1	<340
S2	50-90	F2	350-410
S3	100-150	F3	420-480
S4	160-210	F4	490-550
S5	>220	F5	560-620
		F6	>630



KUVA 7. Painumakartio oikealla, betoni vasemmalla ja ylimmäisenä tiivistys sauva

4.3 Lämmön kehitys

Betoni kehittää lämpöä kovettumisreaktion avulla. Lämpöä syntyy 250–400 kJ/kg kohti. Tätä ilmiötä kutsutaan hydrataatioreaktioksi. Reaktiossa sementti ja vesi kohtaavat ja tuottavat lämpöä. Lämmön nousu normaali olosuhteissa voi olla 0–8 °C. Lämmön nousu nopeuttaa alussa tapahtuvaa lujuuden kehitystä merkittävästi. (Betonitekniiikan oppikirja by 201 2004, 56)

Lämpötilan mittaaminen tapahtuu sähköisillä loggereilla. Ne toimivat paristoilla ja tallentavat dataa asetusten mukaisesti. Kokeissa dataa tallennettiin yhden tunnin välein. Mitattava anturi on kaksijohteinen johto. Johtimien päät kuoritaan ja kierretään yhteen. Mittari mittaa johtojen välistä vastusta. Vastuksen suuruudesta se laskee lämpötilan ja tallentaa sen tunnin välein.

Mittari sijoitetaan keskelle mitattavaa kappaletta. Kappaleen koko on 15 x 15 x 15 cm. Muotti täytetään puolilleen ja sijoitetaan johtimien pää massakeskipisteeseen. Lopuksi muotti täytetään ja tärytetään tiiviiksi. Mittauspiste ei ole täysin keskellä ulkoista teki-joistä johtuen, mutta riittävän lähellä massakeskipistettä.

Mittaustulokset puretaan tietokoneen avulla. Tulokset joita saadaan ovat mittauksilla olevat lämpötilat ja lämpötilan muuttumiskäyrät. Tulokset on mahdollista tulostaa tai muuttaa PDF-tiedostoiksi.

4.4 Ilmamäärä

Ilmamäärä normaalissa betonissa on 1–2 prosenttia. Huokostetuissa betoneissa ilmamäärä on 4–8 prosenttia. Ilma, jota mitataan, on huokosten sisällä oleva ilma. Mitattava ilma ei ole työvirheistä tai huonosta tiivistämisestä johtuvaa. Huokosilmaa ei pystytä poistamaan tiivistämisellä.

Ilmamäärän mittaus tapahtuu ilmamäärämittarilla, joka mittaa huokosilman. Mittari on pyöreä astia, jonka halkaisija on noin 23 cm. Kannessa on painepumppu, kaksi ilma-venttiiliä ja paineventtiiliä sekä ilmamäärämittari. Mittari kertoo suoraan tuloksen prosenttiyksikköinä. Ilmamäärämittari on kuvassa kahdeksan. Mittari on kalibroitu 23.12.2016.

Mittaus alkaa, kun alapuolella sijaitseva astia täytetään betonilla ja tiivistetään. Astian yläreunan päällä on tiiviste, joka putsataan huolella ennen kannen asettamista paikoilleen. Kansi kiinnitetään alapuolella olevaan astiaan neljällä vipulukolla. Kannen ja astian väliin jäävä ilmväli täytetään vedellä. Täyttö tehdään kannen reunoilla olevista ilma-venttiileistä vesipullolla. Kun on varmistuttu, että ilmaa ei ole jäänyt kannen alle, suljetaan ilma-venttiilit. Astiaan pumpataan kannessa sijaitsevalla käsipumpulla painetta. Paine nostetaan pumpulla mittarin maksimiin asti. Kannessa sijaitsevalla punaisella paineventtiilillä, paine tiputetaan mittarin asettamaan nolla kohtaan. Lopuksi painetaan kannessa olevasta vihreästä paineventtiilistä ja mittari osoittaa betonissa olevan ilmamäärän.



KUVA 8. Ilmamäärämittari

4.5 Kutistuma

Betoni kutistuu, kun vapaa vesi haihtuu pois betonimassasta. Tätä ilmiötä kutsutaan kuivumiskutistumiseksi. Tällöin vesi poistuu huokosten välistä ja pakottaa niitä pienempään tilaan. Kutistuminen aiheuttaa betonirakenteisiin sisäisiä jännitystiloja ja halkeamia. Mitä enemmän betonimassassa on vettä, sen suurempaa kuivumiskutistuminen on. Kutistumisen suuruus on 0,4–0,6 promillea. Tämä tarkoittaa 10 metrin laatan kutistuvan 4–6 mm. Jos laatta on kiinni reunoiltaan, halkeamat syntyvät laatan keskelle. (Betontechniikan oppikirja by 201 2004, 90)

Kuivumiskutistumista pystytään ehkäisemään suuremmalla kiviaineksella ja pienentämällä lisättävän veden määrää. Veden määrän vähennys vaikuttaa ratkaisevasti kutistumisen suuruuteen. Lattiavaluissa tyypillisesti käytetty massa on raekooltaan 16 mm.

Kiviaineksen muuttaminen 32 mm kokoiseksi pienentää kuivutuskutistumista. Ongelmia tulee suuremmalla raakoolla betonin pumppauksen kanssa. Myös suunnitellut kutistumaumat ehkäisevät lattian halkeilua ja halkeamat syntyvät haluttuihin kohtiin.

Kokeissa kutistuman suuruutta mitattiin 500 mm pitkällä muotilla. Muotin reunaan kiinnitettiin 1 mm paksu, 50 mm leveä ja 500 mm pitkä muovilista. Listan päihin kiinnitettiin yhteensä 4 kappaletta m4 pultteja. Niiden väli oli 470 mm. Pultit toimivat ankkuripisteinä muoviliuskalle betonissa. Muoviliuska valetaan betoniin valujen yhteydessä.

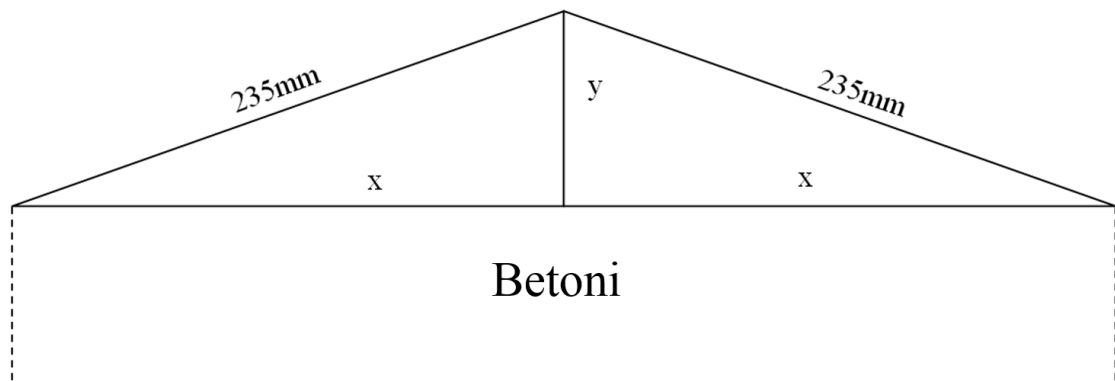
Kun betoni alkaa kutistua muoviliuska alkaa pyrkiä pullistumaan ulospäin. Kun tiedetään muoviliuskan pituus (470 mm) ja pullahtamisen suuruus (y) pystytään laskemaan betonin pituuden muutos (x). Laskukaava toimii pythagoraan lause, kaava 1. Tulokset ilmoitetaan pituuden muutos prosentteina. Kuvat 9 ja 10 selventää kutistumaliuskan toimintaa.

KAAVA 1. Betonin kutistuminen.

$$2x = \sqrt{(235^2 - y^2)}$$



KUVA 9. Kutistumaliuskan toiminta



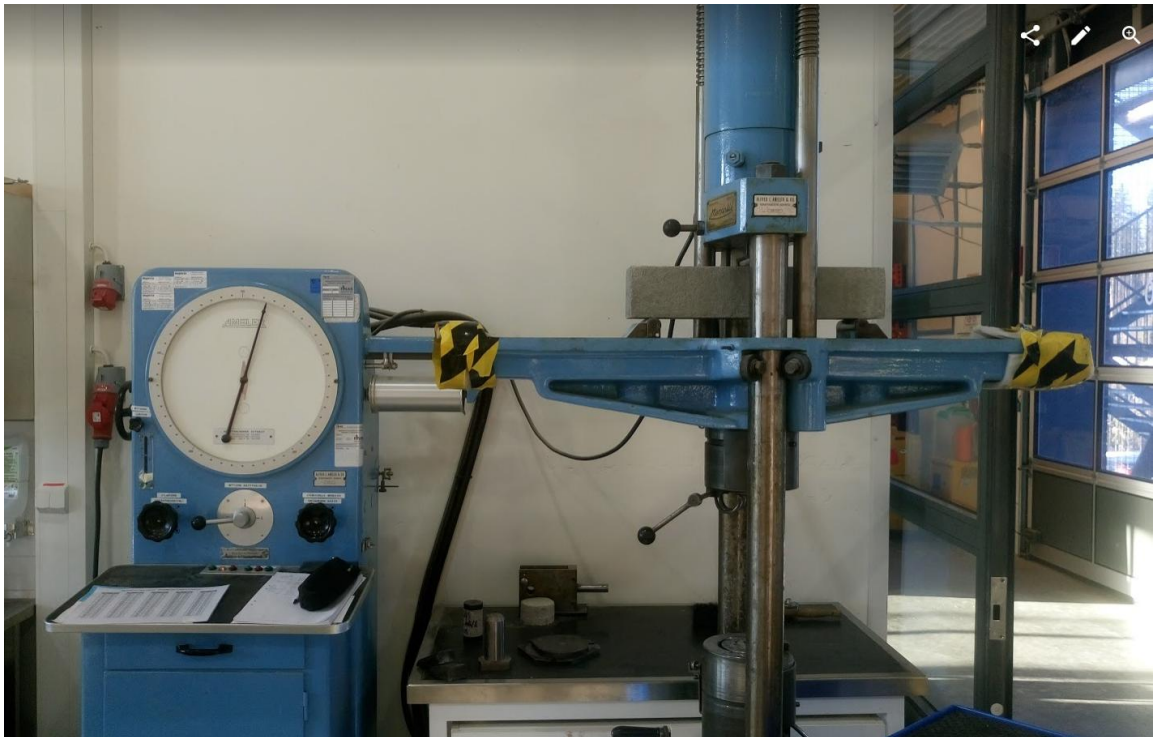
KUVA 10. Betonin kutistuman laskeminen

4.6 Taivutusvetolujuus

Vetolujuus on kymmenesosa puristuslujuudesta. Rakenteet, jossa mitoittavana tekijänä on betonin vetolujuus on vähän. Lähes ainoana esimerkkinä on betonitiet. Betonin halkeilu johtuu betonin vetolujuuden ylittymisestä. Betonin vetolujuus mitataan usein taivutusvetolujuutena. Sen arvo on riippuvainen koekappaleen koosta. (Betoniteknikan oppikirja by 201 2004, 82.)

Koekappaleet, joita käytettiin, betoniset palkit olivat kooltaan 100 x 100 x 500 mm. Kappaleet valettiin metallimuottiin. Tärytys tapahtui tärypöydällä. Yläpinta, joka ei ollut muottia vasten liipattiin teräslastalla suoraksi. Kappaleiden kovettumisaika oli 28 vuorokautta. Kappaleet kovettuivat vuorokauden muotissa, jonka jälkeen ne purettiin. Kappaleita säilytettiin vedessä kovettumassa 26 vuorokautta ja vuorokausi ennen kokeita kappaleet nostettiin kuivumaan.

Kappaleiden taivutus tapahtui hydraulipuristimella, jossa on käsikäyttöiset venttiilit. Mittari on kellotaulun tyyppinen, joka ilmoittaa voiman kilopondeina, kuva 11. Yksi kilopondi vastaa 9,81 Newtonia. Kuvassa 11 on ohjausyksikkö vasemmalla puolella ja puristin oikealla. Jänneväli betonipalkilla on 400 mm ja painava sylinteri tulee keskelle jänneväliä. Alapuolella olevaa kelkkaa nostetaan ja mittari kertoo tuleva puristusvoiman. Mittarissa on kaksi viisaria, musta ilmoittaa puristusvoiman ja punainen viisari osoittaa kokeen aikana tulleen suurimman voiman. Koe päättyy, kun kappale murtuu ja menee poikki.



KUVA 11. Vetolujuuden määrittävä hydraulipuristin.

4.7 Tavoitteet

Kokeiden tavoitteina on saada luotettavat tulokset lisäaineen vaikutuksesta ja sen mahdollisista parannusmahdollisuuksia.

Lujuuden mittaaminen tehdään kolmessa osassa. Mitattavat kappaleet ovat yhden, seitsemän ja 28:n päivää vanhoja. Jokaiselle koepäivälle tehtiin kolme eri koekappaletta. Kappaleita tehtiin kolme, koska betonimassan lujuudet vaihtelevat tärytyksen ja massan ominaisuuksien takia. Yhteensä tulee mitattavia puristuskappaleita jokaisesta eri betonityypistä, yhdeksän koekuutiota. Näiden lisäksi tulee yksi koekuutio, jossa mitataan lämpötilan muutoksia.

Vetolujuutta ja kuivumiskutistumaa mittaavia kappaleita tehtiin molempia yksi. Arvot eivät ole merkittävässä asemassa betonirakenteiden mitoituksessa. Mittausarvot ovat silti tiedettävä, jotta pystytään toteamaan, tuleeko näihin ominaisuuksiin muutoksia. Esimerkiksi jos kuivumiskutistuminen pienenesi merkittävästi sitä pystyttäisiin hyödyntämään betonisissa lattioissa.

Kokeissa käytettiin kahta sementtiä, Finnsementin Rapid 42,5R ja Embran 52,5 R. Kokeissa tehtiin vertailumassa, jossa ei ollut mukana kokeiltavaa lisäainetta. Kokeet suoritettiin kahden prosentin ja neljän prosentin lisäaine massoilla. Lisäaineen määrä on sementin määrästä. Lisäainetta annosteltiin määrää tuotteesta sellaisenaan, joka sisälsi kuiva-ainetta tietyn määrän.

Kokeita tehtiin yhteensä seitsemän kappaletta. Kolme erilaista massaa Finnsementin sementillä ja neljä Embramin sementillä. Embran sementillä tehtiin yksi lisäkoee, jossa lisäaineosentti oli neljä ja lisäaineena toimi EX-315. Tässä lisäkoeeessa lisäaineen kuiva-ainemäärä muuttui.

Sem Flow ELE –notkistinta annosteltiin yksi prosentti sideaineen määrästä. Tällöin betonimassasta tuli notkeampaa, mikä tarkoittaa sen soveltuvan betonivaluihin. Vesi-sementtisuhdetta tavoiteltiin 0,5, mutta se nostettiin ensimmäisen kokeen jälkeen 0,57, jotta massaa pystyisi työstimään. Suhteen nostamiseen vaikutti todennäköisesti kiviainesten kuivuminen. Kun kiviainekset mitattiin, ne olivat saapuneet laboratorioon soraumontulta. Kiviainesten ollessa laboratorioissa niiden kosteus pieneni ja vapaan veden osuus laski. Tämä johti vesi-sementtisuhteen nostamiseen.

5 TULOKSET

5.1 Lujuuden muutokset

Lujuuden muutoksia verrataan vertailu kappaleisiin ja tarkistellaan niiden välille syntyneitä eroja. Täsmennetään kuinka lujuudet muuttuvat koekappaleiden välillä.

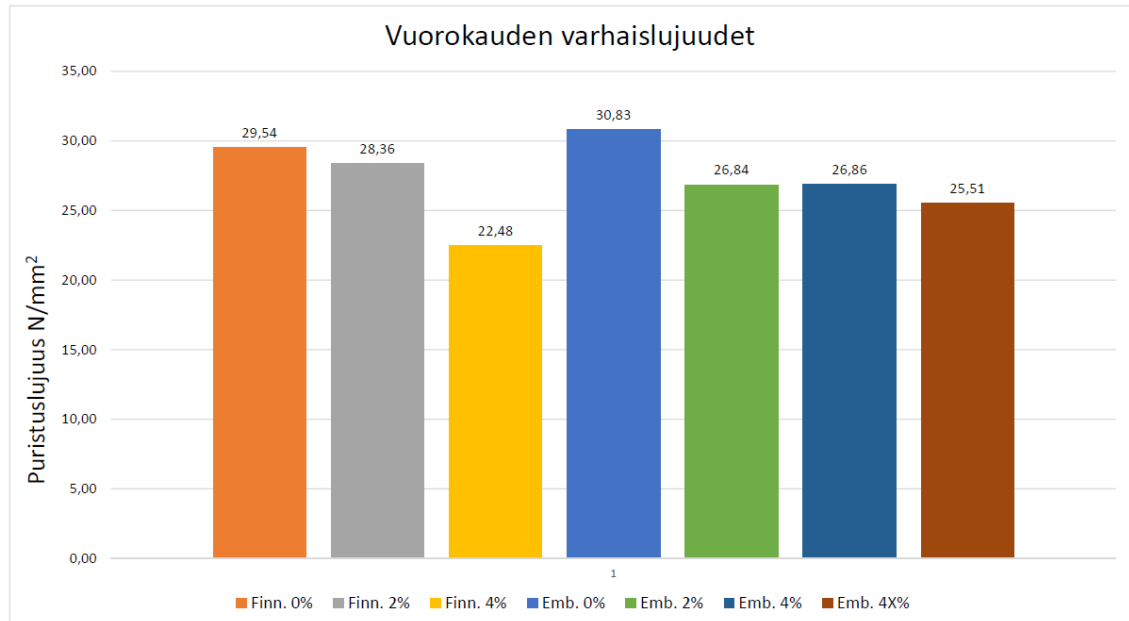
5.1.1 Vuorokauden ikäisten puristuslujuus

Lujuudet olivat keskimäärin vuorokauden jälkeen valusta. Finnsementin sementillä puristuslujuus arvot olivat 28,5–30,0 N/mm² välillä ja Embran sementillä vastaavat arvot olivat 30,0–31,7 N/mm² välillä. Sementtien väliset lujuus erot johtuvat käytetystä sementtien lujuusarvoista. Embran sementti saavuttaa 52,5 N/mm², kun Finnsementin sementti 42,5 N/mm² lopullista puristuslujuutta. Arvioituna By 65 kirjan, sivun 75 kuvan mukaan, betoni on saavuttanut loppulujuudestaan 45–55 prosenttia, mikä tarkoittaisi 50–60 N/mm² lopullista puristuslujuutta. Eli vertailumassa on puristuslujuudeltaan hyvälaatuista ja vastaa kantavissa rakenteissa käytettyä betonia.

Kun EX-305 lisäainetta annosteltiin kaksi prosenttia, puristuslujuuksien arvot laskivat. Saadut tulokset vuorokauden kovettumisen jälkeen olivat Finnsementin sementillä 27,5–29,0 N/mm² ja Embran sementillä 26,4–27,4 N/mm². Lujuudet ovat keskimäärin kahdeksan prosenttia pienemmät kuin vertailumassalla.

Kun EX-305 lisäainetta annosteltiin neljä prosenttia lujuudet laskivat lisää. Lujuudet olivat Finnsementin sementillä 22,3–22,7 N/mm² ja Embran sementillä 26,5–27,3 N/mm². Lujuuden pienentyminen oli 25 prosenttia Finnsementin sementillä ja kymmenen prosenttia Embran sementillä. EX-315 lisäainetta testattiin Embran sementin kanssa. EX-315:llä tuotti vastaavia lujuustuloksia kuin EX-305:llä. Vuorokauden jälkeiset lujuudet olivat 24,7–26,3 N/mm². Taulukossa 9 on esitetty saadut lujuustulokset vuorokauden vanhoille koekappaleille.

TAULUKKO 9. Vuorokauden varhaislujuudet



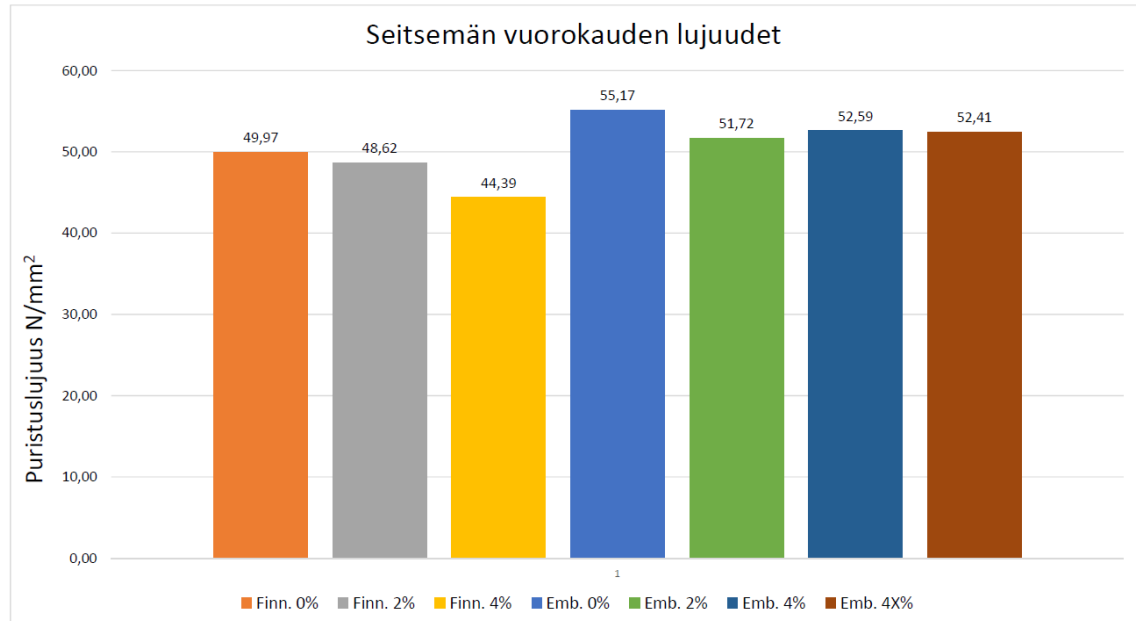
5.1.2 Seitsemän vuorokauden ikäisten puristuslujuudet

Puristuslujuuksien erot olivat seitsemän päivän jälkeen suurimmillaan 5 N/mm². Finnsementin nollamassa saavutti lähes 50 N/mm². Embran nollamassa saavutti 55 N/mm² lujuuden. Nämä ovat hyvät lujuusarvot seitsemän vuorokauden ikäiselle betonille ja kyseiset betonimassat kelpaisivat hyvin kantaviin rakenteisiin.

Massoilla joissa oli lisäainetta kaksi prosenttia puristuslujuudet pienivät. Finnsementin betonin lujuus pieneni noin 1 N/mm². Tämä ei ole mikään suuri luku ja eron voisi selittää koekappaleiden ominaisuuksien perusteella. Embran massan puristuslujuus oli lähes 52 N/mm². Tämä on 3 N/mm² pienempi kuin vertailu massan. Ero on liian suuri, jotta sitä voitaisiin perustella kappaleiden eroavaisuuksilla.

Kappaleet joissa EX-305 lisäaineen annos oli neljä prosenttia, lujuuden muutokset vaihtelivat. Finnsementin kappaleiden lujuus laski 5,6 N/mm². Ero on suurin seitsemän vuorokauden ikäisten kappaleissa. Embran koekappaleissa erot olivat pienemmät, ero referenssiin on 3 N/mm², Myös lisäaineen EX-315 kanssa ero referenssiin on 3 N/mm². Taulukossa 10 on esitetty koekappaleiden lujuudet pylväskaaviona. Kaaviosta pystytään näkemään puristuslujuuksien erot ja havainnoimaan niiden suuruutta.

TAULUKKO 10. Seitsemän vuorokauden puristuslujuudet



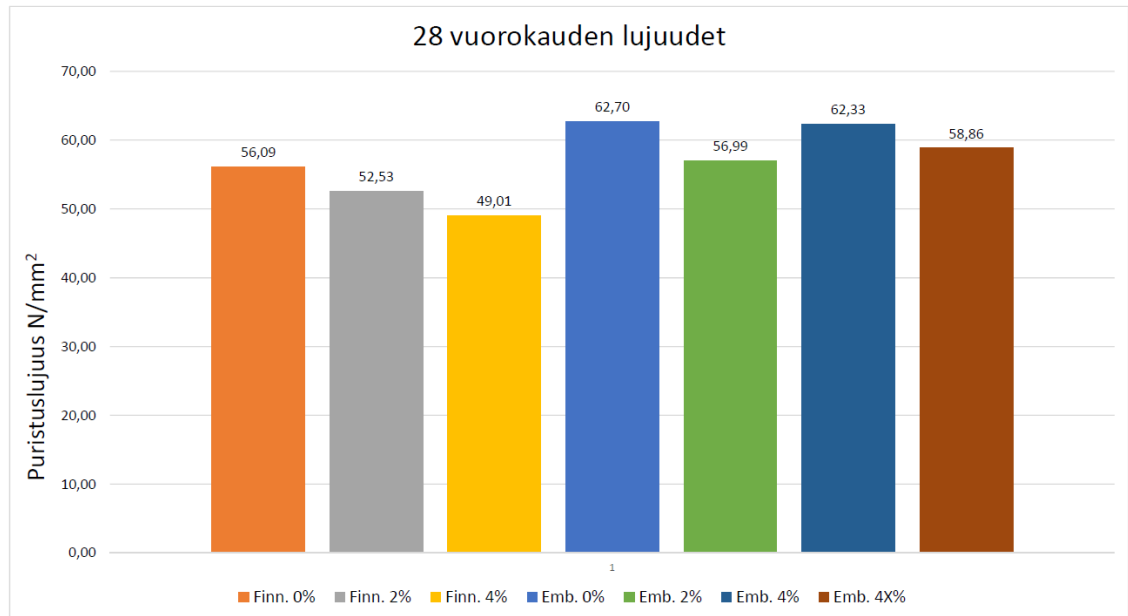
5.1.3 28 vuorokauden ikäisten puristuslujuudet

Käytetty sementti oli nopeasti kovettuvaa eli lopullinen mitoituslujuus saavutetaan seitsemän vuorokauden iässä, mutta kovettuminen jatkuu silti tämän jälkeen. Lujuudet olivat nousseet Finnsementin nollamassalla 12 prosenttia ja Embran 13,6 prosenttia 21 vuorokauden aikana. 28:n vuorokauden ikäisen Finnsementin koekappaleiden lujuus oli 56 N/mm² ja Embran 62,7 N/mm². Sementtien lujuuserojen takia kappaleiden loppulujuudet poikkeavat toisistaan.

Kahden prosentin lisääine annos laskee loppu lujuuksia Finnsementillä 3,5 N/mm² ja Emban 5,7 N/mm². Lujuuksien erot ovat selkeät. Kaikilla kahden prosentin koekappaleilla puristuslujuus laski.

Neljän prosentin lisääineannos laski Finnsementin puristuslujuuksia huomattavasti. Lujuus ero oli 7 N/mm². Taulukosta 12 pystyy havainnoimaan hyvin puristuslujuuksien erot. Embran sementin kanssa lopullinen puristuslujuus ei laskenut juurikaan. Puristuslujuus oli 62,3 N/mm² ja ero oli 0,4 N/mm². Lisäaine EX-315:ta koekappaleiden puristuslujuus pieneni. Lujuudeksi tuli 58,9 N/mm² ja ero Embran nollamassaan oli noin 4 N/mm² mikä on 6,1 prosenttia pienempi. Taulukossa 13 on esitetty puristuslujuuden muutos prosentteina verrattuna vertailumassaa.

TAULUKKO 12. 28 vuorokauden puristuslujuudet



TAULUKKO 13. Puristuslujuuden muutos prosentteina.

Kovettumisaika	Suhteellinen puristuslujuus vertailumassaan (%)		
	1 d	7d	28d
Finnsementti 0%	100,0	100,0	100,0
Finnsementti 2%	96,0	97,3	93,7
Finnsementti 4%	76,1	88,8	87,4
Embran 0%	100,0	100,0	100,0
Embran 2%	87,1	93,7	90,9
Embran 4%	87,1	95,3	99,4
Embran 4%	82,7	95,0	93,9

5.2 Notkeuden muutokset

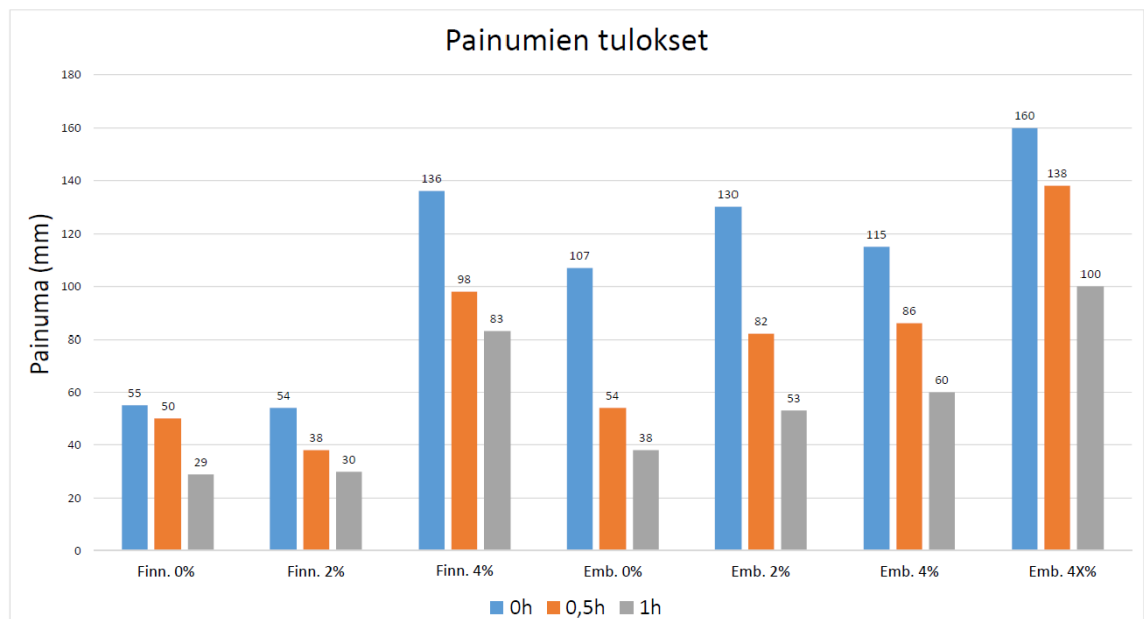
Notkeutta mitattiin painumakokeella, josta on kerrottu kappaleessa 4.2. Kokeiden mitausajat olivat heti valun jälkeen, puolen tunnin ja tunnin kuluttua valusta. Kokeiden tulokset kertovat sitoutumisen kehittymisestä ja massan työstettävyydestä.

Tulokset vaihtelivat suuresti. Pienimmän ja suurimman tuloksen erot ovat yli 100 mm heti valun jälkeen. Mikä tarkoittaa massan käsiteltävyydessä ja työstettävyydessä suurta eroa. Taulukossa 13 on esitetty painumien suuruudet pylväsdiagrammissa.

Finnsementin massan notkeus muuttui huomattavasti lisäaineen ollessa neljän prosenttia. Painuman suuruus heti valun jälkeen oli nollamassan ja kahden prosentin massalla noin 55 milliiä. Sitoutuminen oli tunnin jälkeen lähes sama. Kahden prosentin lisäaine ei vaikuttanut notkeuteen juuri mitenkään. Massa jossa lisäaineen määrä oli neljä prosenttia, painuman suuruus oli 136 mm. Massa oli reilusti notkeampaa kuin nollamassa. Sitoutuminen alkoi vahvasti ja tunnin jälkeen painuma oli 83 mm. Tunnin aikana painuman pieneni 53 mm, mikä kertoo sitoutumisen alkamisesta.

Embran sementillä nollamassan painuma oli reilusti suurempi kuin Finnsementin. Painuma oli 107 mm joka kertoo, että massa olisi helposti työstettävissä. Lisäaine vaikutti painumiin vähän. Painumat nousivat lisäaineen vaikutuksesta 23 mm ja 8 mm, nämä erot eivät vaikuttaneet työstettävyyteen. Lisäaine EX-315:llä painuman suuruus oli 160 mm. Tulos on 53 mm suurempi kuin nollamassalla. Työstettävyyys parani huomattavasti lisäaineen myötä. Sitoutuminen alkoi normaalisti, vaikka notkeus parani.

TAULUKKO 14. Painumien tulokset



5.3 Lämmön kehitys

Lämmön nousu on voimakkaampaa nopeammin kovettuvilla betoneilla. Kokeissa käytettiin seitsemässä vuorokaudessa kovettuvaa betonia. Tämä johti koekappaleissa lähes yhdeksän asteen lämpötilan nousuun. Eniten lämpöä nosti Finnsementin nollamassa ja Finnsementin kahden prosentin massalla joiden lämpötilan nousu oli 8,9 astetta. Alla olevassa taulukossa 14, nähdään kappaleiden lämpötilojen nousut celsius asteina. Korkeimmasta lämpötilasta on vähennetty alkulämpötila, josta on saatu lämpötilojen nousu.

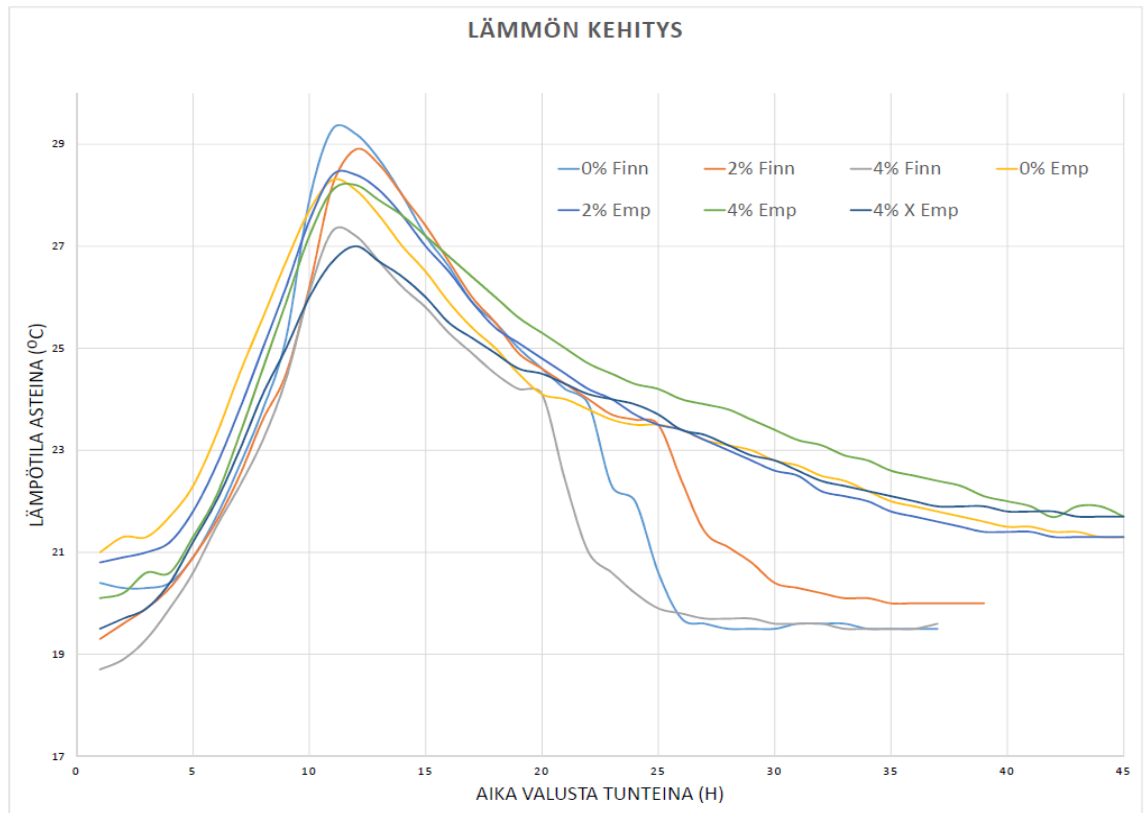
TAULUKKO 15. Lämpötilojen nousun muutokset

Finn. 0%	Finn. 2%	Finn. 4%	Emb. 0%	Emb. 2%	Emb. 4%	Emb. 4X%
8,9°C	8,9°C	8,6°C	7,3°C	7,6°C	8,0°C	7,2°C

Taulukosta 15 voidaan päätellä miten kokeiltu lisäaine on vaikuttanut hydrataatio reaktioon. Finnsementin sementin yhteydessä lisäaine on hieman laskenut korkealla annosmäärällä lämpötilaa. Embran sementin yhteydessä se on hieman nostanut lämpötilaa. Lisäaine ei ole juurikaan muuttanut lämpötilan kehitystä. Lämpötilan nousut eivät ole merkittäviä ja osa niistä voi johtua ulkoisista tekijöistä. Ulkoisia tekijöitä on esimerkiksi hallissa olevat lämmittimet jotka toimivat termostaattien avulla.

Taulukossa 16 on esitetty lämpötilojen nousut ja laskut. Finnsementin kappaleilla on 20 tunnin jälkeen jyrkkä lasku. Lasku johtuu, kun kappaleet purettiin muoteistaan ja tästä syystä kappaleen lämpötila pääsi laskemaan voimakkaammin. Embran kappaleita ei purettu ennen 45 tuntia, jotta saatiin tuloksista kauniit laskevat käyrät. Lämpötilojen huiput saavutettiin kaikissa 10–15 tunnin kuluttua valusta.

TAULUKKO 16. Lämpötilojen kehitys



5.4 Ilmapitoisuuden muutokset

Finnsementin sementin kanssa betonissa oleva huokosilman määrä nousi tasaisesti lisäaineen määrän noustessa. Embran sementin kanssa nousun määrä oli vaihtelevampaa, kuten taulukosta 17 voidaan nähdä. Tavallisen ilman määrä betonissa on kahden prosentin luokkaa. Ilma määrää tulkitessa voidaan todeta viimeisen lisäaineen sopivan betonimassaan paremmin, se EX-315 ei vaikuttanut massassa olevaa ilmamäärään, toisin kuin EX-305 lisäaine.

Embran massalla tehty neljän prosentin koe antoi poikkeavan tuloksen. Sen ilmamäärä laski suhteessa kahden prosentin kokeeseen. Tuloksen syytä on vaikea selittää, koska Finnsementin massan yhteydessä ilmamäärä nousi tasaisesti. Lisäaine EX-315 ei aiheutanut ilmaa betonimassaan vaan ilman määrä pysyi matalana.

TAULUKKO 17. Ilman määrät betonimassassa

Finn. 0%	Finn. 2%	Finn. 4%	Emb. 0%	Emb. 2%	Emb. 4%	Emb. 4X%
1,6%	3,0%	4,2%	1,6%	3,6%	2,9%	1,4/1,9%

5.5 Kutistuman muutokset

Kutistuman muutokset olivat kaikilla kappaleilla lähes samat. Lisäaineiden vaikutus koekappaleisiin ei ole havaittavissa. Taulukossa 18 on kutistumaliuskan ulkonema eli kuinka paljon se on pullistunut, kappaleen kutistuman suuruus ja kutistuman määrä prosentteina. Kuva 11 selventää kutistumaliuskan toimintaa. Tulokset eivät vaihdelleet paljoa kun verrataan niitä Tampereen ammattikorkeakoululla saatuihin tuloksiin. Tutkimukset tehdään betonitekniiikan jatko -kurssilla.

TAULUKKO 18. Kutistuma 28 vuorokauden jälkeen

Kutistuma 28 d jälkeen			
Betonimassa	Pullistuma mm	Kutistuma mm	Kutistuma (%)
Finnsementti 0%	18	1,4	0,29
Finnsementti 2%	18	1,4	0,29
Finnsementti 4%	19	1,5	0,33
Embran 0%	19	1,5	0,33
Embran 2%	18	1,4	0,29
Embran 4%	19	1,5	0,33
Embran 4X%	18	1,4	0,29

5.6 Vetolujuuden muutokset

Taivutusvetolujuuksien arvot ovat kaikki suhteessa puristuslujuuteen lähes samoja. Suhde puristuslujuuteen on laskettu taivutusvetovastuksen suhteen puristuslujuuteen. Taulukossa 19 on taivutusvetolujuuden arvot ja niiden suhde kyseisten kappaleiden puristuslujuuteen. Taivutusvetolujuuksien vaihtelu on lisäaineen kanssa verrattuna nollamassaan suurimmillaan $1,8 \text{ N/mm}^2$. Tämä tarkoittaa kahden prosentin eroa suhteessa puristuslujuuteen.

Finnsementin massassa lisäaine lisäsi kahden prosentin massassa vetolujuutta hieman, mutta laski neljän prosentin massassa. Suuria muutoksia ei vetolujuuteen tullut. Embran massassa vetolujuus laski kaksi prosenttia suhteessa nollamassaan. Lisäaine EX-315 kanssa vetolujuus laski suhteessa nollamassaan, mutta oli hieman parempi kuin ensimmäisellä lisäaineella.

TAULUKKO 19. Taivutusvetolujuuksien arvot

Betonimassa	Taivutusvetolujuus	Suhde puristuslujuuteen (%)
Finnsementti 0%	6,24 N/mm ²	11,1
Finnsementti 2%	6,36 N/mm ²	12,1
Finnsementti 4%	5,53 N/mm ²	11,3
Embran 0%	7,42 N/mm ²	11,8
Embran 2%	5,59 N/mm ²	9,8
Embran 4%	6,09 N/mm ²	9,8
Embran 4X%	6,59 N/mm ²	11,2

6 POHDINTA

Betoniin lisättävä aine EX-315 paransi notkeutta, pienensi puristuslujuutta ja kasvatti suhteellisen ilman määrää. Lisäainetta käyttäen betonin notkeus lisääntyi huomattavasti, puristuslujuus pieneni, mutta huokosilma ei lisääntynyt. Tämä aine sopisi näiden tutkimusten perusteella kahdesta testatusta paremmin betoniin.

Muutokset lämmönkehityksessä, kutistumassa ja vetolujuudessa eivät poikenneet oleellisesti lisäaineettomasta vertailumassasta. Lämmön kehityksessä erot olivat maltillisia ja voivat olla ulkoisista tekijöistä johtuvia. Kutistumassa ei havaittu käytännössä mitään eroa massojen välillä. Mittausmenetelmällä pystytään havaitsemaan oleelliset muutokset, mutta erot olivat alle 0,1 millimetriä 470 millimetrin mitattavalla matkalla. Taivutusvetolujuuksien tulokset tukivat havaittuja puristuslujuuksia. Ne korreloivat puristuslujuuteen liki vakioasti kunkin sementin ja lisäaineen osalta. Korrelaatiosta saadaan suhde, jonka avulla pystytään toteamaan, ettei betonin lujuusopillisessa käyttäytymisessä ole merkittävää muutosta tai poikkeamaa materiaaliteorioihin nähden.

Lisäaineen käytön myötä kasvanut vesi-sementtisuhte vaikuttaa pienissä määrin puristuslujuuden alenemiseen. Jos vesi-sementtisuhte voidaan pitää verrokkimassaa vastaavana, saataisiin todennäköisesti parempia puristuslujuus tuloksia. Tällöin PCC kuiva-aines määrää pystyttäisiin nostamaan ilman lisäveden aiheuttamaa muutosta. Nyt käytetty lisäaine sisältää noin kaksi kolmasosaa vettä ja tämä vaikuttaa vesi-sementtisuhdetta kasvattavasti. Nousu on noin 0,015 kahta lisäaine prosenttia kohti.

Käyttäen lisäainetta EX-315 saadaan betonimassa notkeammaksi. Notkeus on keskeinen tavoite massan toimivalle käytölle valussa. Lisäaineen avulla voidaan alentaa vesi-sementtisuhdetta ja tämä pääsääntöisesti nostaa puristuslujuutta. Lisäaine ei myöskään testien perusteella tuottanut lisää ilmaa betoniin mikä on positiivinen asia.

Massaan sekoittaminen vaikuttaa lisäaineen jakautumiseen betonissa. Kokeissa lisäaine lisättiin viimeisenä betonimassaan, jonka jälkeen betonimassaa sekoitettiin 2–3 minuuttia. Parannusehdotus betonimassan valmistukseen voisi olla että, lisäaine sekoitettaisiin viimeiseen annosteltavaan vesiannokseen. Tällöin varmistuttaisiin lisäaineen tasainen levittyminen betonimassaan ja massan tasaisista ominaisuuksista.

Vertailtavan lisäaineen, EX-305, käyttö nostaa huokosilman määrää ja on jatkotutkimuksen asia selvittää mikä ilmiöön on syynä. On mahdollista, että lisäaineessa oleva dispergointiaine johtaa ilmamäärän kasvuun. Lisäaine EX-305:ssa oli dispergointiainetta 21 prosenttia enemmän kuin lisäaine EX-315:ssa. Tämä voisi selittää huokosilman lisääntymisen koebetonissa verrattuna verrokkimassan yksittäiskokeeseen. Käytettyjen sementtien eroavaisuudet eivät vaikuttaneet huokosilman suuruuteen voimakkaasti. Sementteinä käytettiin Rapidin seossementtiä, joka sisälsi sementtiklinkkeriä ja vähän kalkkikiveä ja Embran sementtiä, joka on lähes puhdasta sementtiklinkkeriä.

Taulukosta 20 voidaan vertailla kappaleiden suhteellisia lujuuksia, ilman määrää sekä lämpötilan nousua. Lisäaineettomat massat (merkattu 0%) toimivat vertailukohtina. Ihanne tuloksissa ilman määrän nousua ei tulisi olla ja lämpötilan nousu olisi normaali massaa vastaavaa tai korkeampaa. Nämä vaikuttaisivat positiivisesti betonikappaleiden puristuslujuuksien kehittymiseen ja jopa suuruuteen.

Taulukosta voidaan havaita ilmamäärän nousun vaikutus puristuslujuuden pienentymiseen. Taulukkoa tulkitessa täytyy muistaa käytetty sementti, josta tehty betoni on seitsemän vuorokauden jälkeen saavuttanut nimellislujuuden. Tämän jälkeen tapahtuva mahdollinen kovettuminen on betonin muista ominaisuuksista johtuvaa kovettumista.

TAULUKKO 20. Kappaleiden yhdistetyt tiedot

Kappaleiden yhdistetyt tiedot							
Massa	0 % Finn	2 % Finn	4 % Finn	0 % Emp	2 % Emp	4 % Emp	4 % X Emp
1 d (%)	100,0	96,7	76,1	100,0	87,1	87,1	82,7
7 d (%)	100,0	97,3	88,8	100,0	93,7	95,3	95,0
28 d (%)	100,0	93,7	87,4	100,0	90,9	99,4	93,9
Ilma (%)	1,5	3,0	4,2	1,6	3,6	2,9	1,4/1,9
Lämmön nousu	8,9	8,9	8,6	7,3	7,6	8,0	7,2

Jatkotutkimuksissa on huomioitava lisäaineen aiheuttama vesi-sementtisuhteen nousu. Lisäaineen vapaan veden osuus on syytä vähentää lisättävästä vedestä. Tämän jälkeen koekappaleet ja niiden ominaisuudet ovat tarkemmin verrattavissa toisiinsa, kun lisäveden vaikutuksesta johtuva puristuslujuuden pienentyminen voidaan poistaa muuttujista. Lisäaineen sekoittuminen tasaisesti betonimassaan kahden minuutin sekoituksen jälkeen ei ollut täysin varmaa, vaikka betonimassa vaikutti tasalaatuiselta työn suorituksen ai-

kana. Kokeiltava lisäaine on veteen sekoittuvaa, joten se on helppo sekoittaa viimeiseen lisättävään annosveteen ja näin varmistetaan sen tasainen levittäytyminen betonimassassa.

Lisäaineen vaikutusta betonin notkeuteen kannattaa tutkia tarkemmin esimerkiksi kattavammalla koesarjalla ja eri lämpötiloissa. Koesarjaa tehtäisiin kolme kertaa ja kolmena eri mittausajankohtana. Mittaukset tehtäisiin heti, puolen tunnin ja tunnin päästä massan valmistuksesta. Lämpötiloina olisi Suomen talvea ja kesää vastaavat sekä mahdollista vientiä ajatellen kohdemaan olosuhdelämpötilat.

Lisäaineen vaikutusta kannattaa kokeilla myös ilman sementin seosaineita. Tällainen testaus näyttäisi lisäaineen tuomat ominaisuudet selkeämmin. Sementissä olevan maasuunikuonan ominaisuudet näyttäisivät vaikuttavan puristuslujuuden pienenemiseen lisäainetta käytettäessä korostetusti. Tämä tulee erityisesti huomioida käytettäessä eri sementtilaatuja mahdollisissa jatkotutkimuksissa.

LÄHTEET

Finnsementti. 25.07.2016. Rapidsementti. Pdf. Luettu. 08.03.2017
http://www.finnsementti.fi/fsproductdb/files/test/rapidsementti_1_25072016_085644.pdf

Johansson, K ja Mannonen, R. 2016. Betoninormit 2016 by 65. Helsinki: Suomen betoniyhdistys ry.

Lujabetoni. 01.01.2013. Valmisbetonihinnasto. Pdf. Luettu. 24.01.2017
<http://docplayer.fi/23693641-Valmisbetonihinnasto-2013.html>

Rakennusten paloluokitus. 08.11.2013. RakMK E1 – Finnisol. Pdf. Luettu. 08.02.2017
www.finnisol.fi/Download/21754/liite5.pdf

Rudus 03.01.2016. Betonihinnastot. Pdf. Luettu. 24.01.2017
<http://www.rudus.fi/hinnasto-ja-esitteet/hinnastot/betoni-hinnasto>

Semtu. 24.09.2015. Sem Flow ELE 20. Pdf. Luettu 11.01.2017
<https://www.semtu.fi/files/1913/2342/2415/Semflow-ELE-20-1.pdf>

Suomen Betoniyhdistys r.y. 2012. Betonitekniikan oppikirja 2004 by 201. 7. painos. Helsinki: BY-koulutus Oy.

Suomen Betoniyhdistys r.y. 2009. Betonin kiviainekset 2008 by 43. Helsinki: Suomen betonitieto Oy.